



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

ВЕСТНИК

2024 .
Том 30.
№ 4.

ТАМБОВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА

Transactions of the Tambov
State Technical University

2024.

Том 30.

№ 4

<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. № 4.

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

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

*Основан в 1995 году
Выходит 4 раза в год*

<http://vestnik.tstu.ru>

**Россия Тамбов
Издательство ТГТУ**

Совет редакторов

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Сафаров Джавид, 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: gatapova.nc@mail.tstu.ru

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

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

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

Подписано в печать 06.12.2024. Дата выхода в свет 20.12.2024.

Формат 70×108/16. Усл. печ. л. 15,40; уч.-изд. л. 17,60. Тираж 100 экз. Цена свободная. Заказ 039.

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	538
Соловьев Д. С. Методология поддержки принятия решений при интеллектуальном управлении технологическими системами производства гальванических покрытий ...	538
Матвейкин В. Г., Правин П. К., Дмитриевский Б. С., Терехова А. А. Математическая модель прогнозирования отказов автономного самоспасателя (на английском языке).....	547
Егоров С. Я., Немтинов В. А., Авцинов И. А. Планирование остановочных ремонтов на предприятиях химической промышленности	558
Павлов В. И., Дорохова Т. Ю., Артемова С. В., Толстых С. В. Оперативная коррекция веса априорной информации в байесовском алгоритме распознавания состояния информационно-измерительной и управляющей системы	573
Орлов С. П., Ефимушкин Н. А., Ефимушкина Н. В. Система диагностики рельсовых скреплений на высокоскоростных железных дорогах на основе глубокой нейронной сети	581
Хаустов И. А., Битюков В. К., Романов Р. А., Маслов А. А., Дворникова А. С. Метод обработки первичных данных гель-проникающей хроматографии растворов каучуков промышленного назначения для автоматизированного расчета их фракционных составов	594
Иванов А. В., Москвитин С. П., Иванов А. А., Лежнева Н. А. Информационно-измерительная и управляющая система на основе спутниковой радионавигационной системы для решения задач посадки летательных аппаратов.....	608
Ерашова Ю. Н., Тюрин А. Н., Гарифуллина Н. А., Мусина Л. Ф. Устройство для проверки аппаратов защиты от последовательного и параллельного дуговых пробоев и искровых промежутков.....	621
Чернышов В. Н., Королев А. П. Полупроводниковый первичный измерительный преобразователь температуры для летательных аппаратов	630
Процессы и аппараты химических и других производств. Химия	640
Карпушкин С. В., Краснянский М. Н. Принципы автоматизированного проектирования технологического оборудования многоассортиментных химических производств	640
Голованчиков А. Б., Залипаева О. А., Меренцов Н. А., Раева Ю. Н. Оценка влияния вибрации на процесс массообмена в насадочной экстракционной колонне....	652
Соколов М. В., Беляев П. С., Туляков Д. В., Брянкин К. В. Применение ультразвука при экструзии длинномерных профильных резинотехнических заготовок с заданными показателями качества	663
Киясова Г. М., Ломакина В. А., Абоносимов О. А., Селиванов Ю. Т., Шель Н. В., Брянкин К. В. Исследование кинетических коэффициентов процесса электромебранной очистки технологических растворов от катионов тяжелых металлов.....	670
Юровская М. А., Леонтьев В. К., Лебедев А. Е. Расчет минимального размера частиц, улавливаемых в первой ступени пылеуловителя-классификатора	681
Щербакова Л. А., Петрикова Е. А., Гордиенко М. Г., Сафаров Р. Р., Щекотихин А. Е. Исследование влияния полимерной матрицы и технологических параметров распылительной сушки на свойства порошковой ингаляционной композиции.....	687
Машиностроение. Металлообработка.....	697
Соколов М. В., Беляев П. С., Туляков Д. В. Влияние режимных переменных и конструктивных параметров оборудования на энергозатраты и показатели качества длинномерных резинотехнических заготовок	697

CONTENTS

Automation. Information Technology.	
Control. Instruments	538
Solovjev D. S. Methodology of Decision-Making Support in Intelligent Control of Industrial Systems for Galvanic Coatings Production	538
Matveykin V. G., Praveen P. K., Dmitrievsky B. S., Terekhova A. A. A Mathematical Model for Predicting Failures of a Self-Contained Self-Rescuer (<i>in English</i>)	547
Egorov S. Ya., Nemtinov V. A., Avtsinov I. A. Planning of Shutdown Repairs at Chemical Industry Enterprises	558
Pavlov V. I., Dorokhova T. Yu., Artemova S. V., Tolstykh S. V. Operational Correction of the Weight of a Priori Information in the Bayesian Algorithm for State Recognition of the Information-Measuring and Control System.....	573
Orlov S. P., Efimushkin N. A., Efimushkina N. V. Diagnostic System for Rail Fastenings on High-Speed Railways Based on a Deep Neural Network.....	581
Khaustov I. A., Bityukov V. K., Romanov R. A., Maslov A. A., Dvornikova A. S. A Method for Processing Primary Data of Gel Permeation Chromatography of Industrial Rubber Solutions for Automated Calculation of their Fractional Compositions	594
Ivanov A. V., Moskvitin S. P., Ivanov A. A., Lezhneva N. A. Information-Measuring and Control System Based on Satellite Radionavigation System to Land Aircraft	608
Erashova Yu. N., Tyurin A. N., Garifullina N. A., Musina L. F. Arc-Fault Protection Devices against Sequential and Parallel Arc Breakdowns and Arc Gaps.....	621
Chernyshov V. N., Korolev A. P. Semiconductor Primary Measuring Temperature Transducer For Air Vehicles.....	630
Chemical Engineering and Related Industries.	
Chemistry	640
Karpushkin C. V., Krasnyanskiy M. N. Principles of Computer-Aided Design of Process Equipment for Multi-Product Chemical Industries	640
Golovanchikov A. B., Zalipaeva O. A., Merentsov N. A., Raeva Yu. N. Evaluation of Impact of Vibration on Mass Transfer Process in Packed Extractor Column.....	652
Sokolov M. V., Belyaev P. S., Tulyakov D. V., Bryankin K. V. Application of Ultrasound in Extrusion of Long Profile Rubber Billets with Specified Quality Parameters.....	663
Kiyasova G. M., Lomakina V. A., Abonosimov O. A., Selivanov Yu. T., Shel N. V., Bryankin K. V. Efficiency of Electromembrane Purification of Process Solutions from Heavy Metal Cations.....	670
Yurovskaya M. A., Leontiev V. K., Lebedev A. E. Calculation of the Minimum Size of Particles Captured in the First Stage Dust Collector-Classifer	681
Shcherbakova L. A., Petrikova E. A., Gordienko M. G., Safarov R. R., Shchekotikhin A. E. A Study of the Influence of Polymer Matrix and Process Parameters of Spray Drying on the Properties of Powder Inhalation Composition	687
Material Science. Nanotechnology	697
Sokolov M. V., Belyaev P. S., Tulyakov D. V. The Influence of Mode Variables and Design Equipment Parameters on Energy Consumption and Quality Parameters of Long Rubber Billets	697

**МЕТОДОЛОГИЯ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ
ПРИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОМ УПРАВЛЕНИИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ ПРОИЗВОДСТВА
ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ**

Д. С. Соловьев✉

*Кафедра математического моделирования и информационных технологий,
solovjevdenis@mail.ru; ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет
имени Г. Р. Державина», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: интеллектуальная система управления; методология; неопределенность; система поддержки принятия решений; технологические системы производства гальванических покрытий; человеческий фактор.

Аннотация: Приведено описание причин неопределенности, обуславливающей снижение эффективности функционирования технологических систем производства гальванических покрытий. Рассмотрена и проанализирована методология создания проблемно-ориентированных систем поддержки принятия решений и интеллектуального управления в условиях неопределенности для повышения эффективности функционирования технологических систем производства гальванических покрытий. Приведена взаимосвязь принципов системного подхода, методов и алгоритмов, формирующих предлагаемую методологию. Продемонстрирована архитектура и дано описание алгоритмического обеспечения систем.

Введение

Гальванические покрытия являются ключевыми операциями для защиты деталей от коррозии, улучшения механических свойств и придания декоративных качеств. В условиях растущих требований к технологическим системам производства гальванических покрытий (ТСПГП) повышение эффективности их функционирования становится важной задачей для многих отраслей промышленного производства. Многочисленные исследования в данной предметной области направлены на оптимизацию технологических систем через разработку оборудования и настройку параметров управления [1 – 5]. Эффективность функционирования ТСПГП существенно зависит от качества принимаемых решений и сформированных управлений. Однако неопределенность, вызванная сложностью их влияния на состояние объекта (ТСПГП) и субъективностью выбора методов для решения данных задач лицом, принимающим решение (ЛПР), приводит к снижению прогнозируемости и, как следствие, эффективности функционирования ТСПГП. Сложность оценки влияния принятых решений и сформированных управлений обусловлена многообразием факторов, оказывающих нелинейный характер влияния на объект, при наличии нескольких альтернатив и многокритериальности задачи. Субъективность выбора методов решения задачи связана

с индивидуальными опытом, знаниями и предпочтениями ЛПР. Отсутствие единого подхода для выбора методов приводит к разным результатам при одинаковых начальных данных, что создает мультивариантность, которая затрудняет повышение эффективности функционирования ТСПГП. В свою очередь, отклонение реальных значений входных переменных от значений, используемых при принятии решений и формировании управляющих воздействий, также может негативно сказаться на эффективности функционирования ТСПГП. Существующие меры по повышению эффективности ТСПГП, такие как стандартизация принятых решений и формируемых управлений и переобучение, часто оказываются недостаточными. Поэтому актуальна необходимость использования проблемно-ориентированных систем поддержки принятия решений (СППР) и интеллектуального управления (ИСУ), которые помогут ЛПР обосновать принятые решения и сформированные управления для повышения функционирования ТСПГП. Для создания таких систем требуется разработка соответствующей методологии.

Цель работы – создание методологии поддержки принятия решений при интеллектуальном управлении ТСПГП для повышения эффективности их функционирования.

Постановка задачи для методологии.

Взаимосвязь формирующих ее принципов, методов и алгоритмов

Сформулируем задачу принятия решений и формирования управлений, в рамках разрабатываемой методологии: для заданных входных переменных X (конфигурация детали) необходимо подобрать такие управляющие воздействия U (оборудование и режим его работы), соответствующие возможным альтернативам A (вариантам оснастки гальванической ванны), которые обеспечивают для выходной переменной Y (толщина гальванического покрытия на поверхности детали) экстремальные значения критериев эффективности K . Решение задачи усложняется субъективным выбором методов нормализации разнородных данных f , расчета весовых коэффициентов Φ и принятия решений F , а также типа ИСУ (на базе ассоциативной памяти или нечеткого логического вывода) для формирования управления и ее настройки. На рисунке 1 отображена связь между принципами, методами и алгоритмами, которые составляют методологию поддержки принятия решений при интеллектуальном управлении ТСПГП. В основе принципов системного подхода при реализации СППР и ИСУ используются: информативность П1; эффективность П2; модульность П3; неопределенность П4; эквивиальность П5; интеллектуальность П6; быстроедействие П7. Методы (М) и алгоритмы (А), лежащие в основе функционирования проблемно-ориентированной СППР и ИСУ: выбор метода нормализации данных (М1, А1) [6]; агрегация значений весовых коэффициентов значимости критериев (М2, А2) [7]; расчет коэффициентов компетентности участников голосования (М3, А3.1, А3.2) [8]; формирование знаний в ассоциативной памяти (М4, А4) [9]; расчет весовых коэффициентов значимости входных переменных из ассоциативной памяти (М5, А5); поиск содержимого ассоциативной памяти (М6, А6); определение параметров функций принадлежности термов лингвистических переменных (М7, А7); формирование стабилизирующего управления процессом (М8, А8) [10]; выбор типа ИСУ (М9, А9). Количественная оценка минимизации человеческого фактора по методам М1 – М9, реализованных с помощью алгоритмов А1 – А9, осуществляется посредством анализа сокращения пространства допустимых решений с точки зрения уменьшения числа вариантов для выбора методов нормализации данных f , вычисления весовых коэффициентов Φ и принятия решений F , а также параметров настройки нечеткого вывода. Кроме того, оценивается расхождение результатов кластеризации ассоциативной памяти, полученных с учетом значимости входных переменных и без учета их значимости.

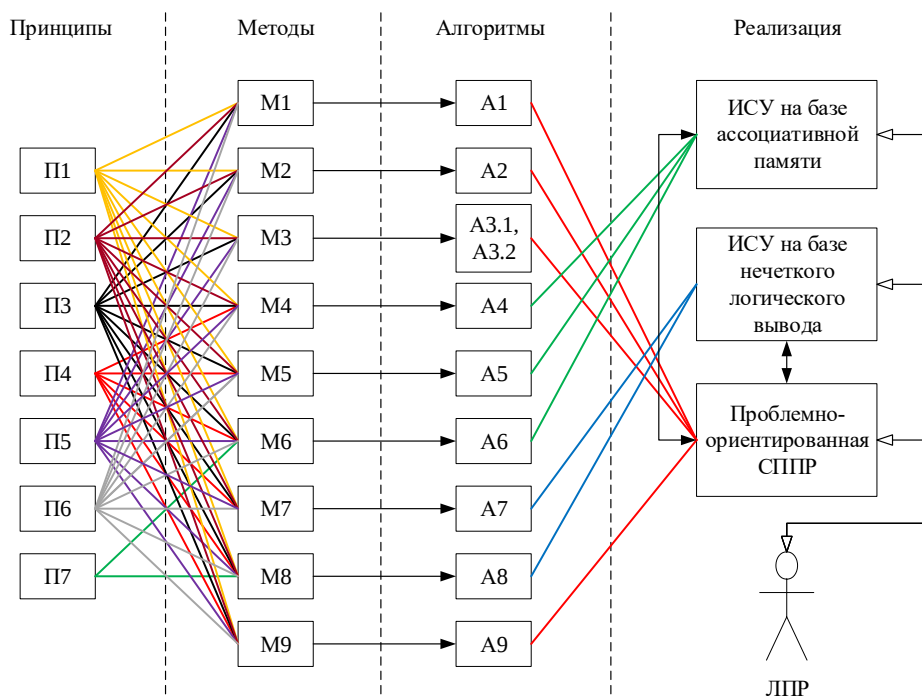


Рис. 1. Методология поддержки принятия решений при интеллектуальном управлении ТСПГП

Архитектура и алгоритмическое обеспечение СППР

Архитектура проблемно-ориентированной СППР, которая состоит из нескольких взаимодействующих подсистем, показана на рис. 2.

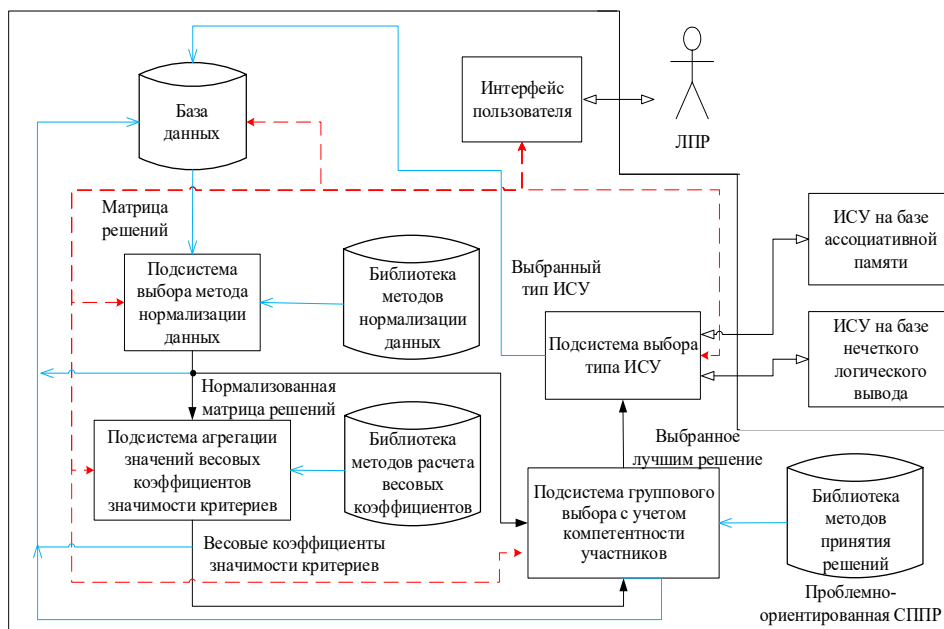


Рис. 2. Архитектура проблемно-ориентированной СППР

Алгоритмическое обеспечение проблемно-ориентированной СППР включает: ввод исходных данных (матрица решений для вариантов нанесения гальванического покрытия), нормализацию матрицы решений, агрегацию весов критериев в ней, определение оптимального решения (оборудования) путем группового голосования и формирование планов экспериментов по расчету параметров управления (рис. 3). Если результаты не удовлетворяют требуемой значимости по статистическому критерию χ^2 , то процесс расчета повторяется, иначе выводятся полученные результаты (выбранное оборудование и параметры управления) для ТСПП.

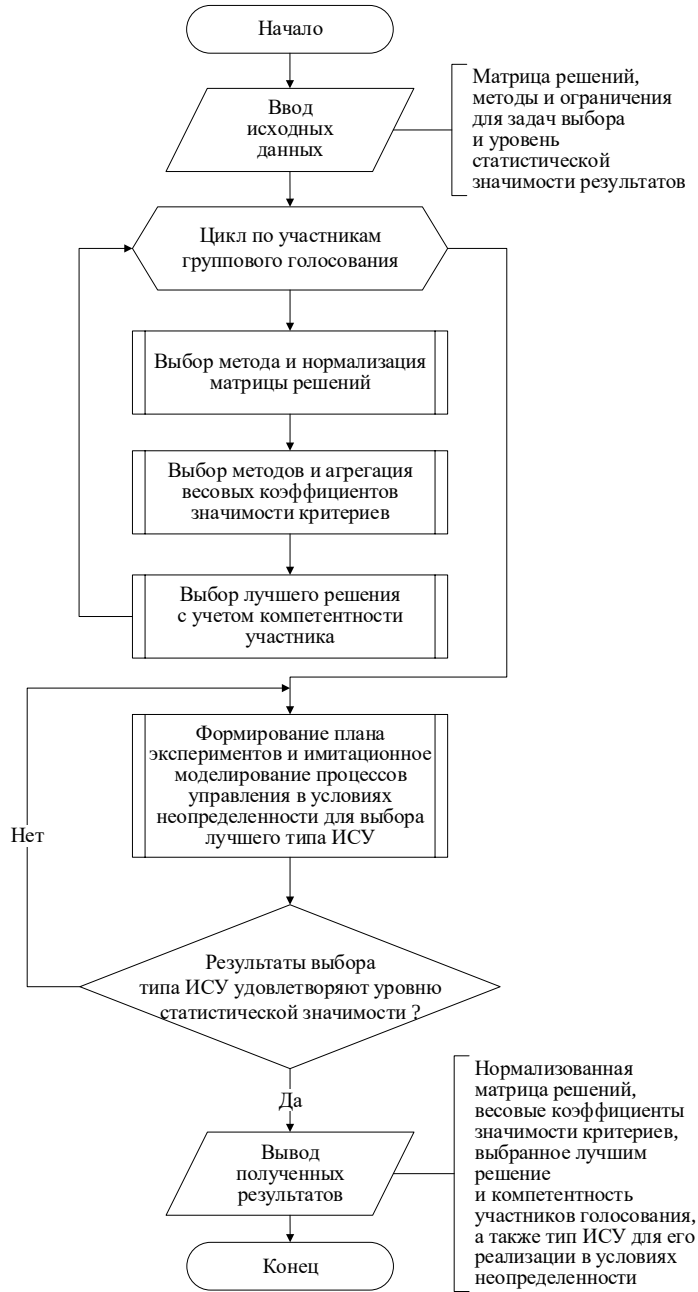


Рис. 3. Алгоритмическое обеспечение проблемно-ориентированной СППР

Вычислительный эксперимент

Функционирование разработанных систем проанализировано на примере выбора типа ИСУ, основанной на ассоциативной памяти (АП) или нечетком логическом выводе (НЛВ) для ТСПГП, при этом акцент сделан на условиях неопределенности значений таких факторов, как длительность процесса электролиза, площадь обрабатываемой детали, температура и кислотность электролита.

Эффективность функционирования ТСПГП оценивается с точки зрения минимизации взвешенных относительных расхождений между ожидаемыми оптимальными критериями: равномерностью покрытий, производительностью процесса, расходом ресурсов и стоимостью выполнения работ, и фактическими значениями, полученными в условиях неопределенности. Для количественной оценки этих критериев использованы заранее определенные веса, которые составляют: для равномерности покрытий – 0,112; производительности процесса – 0,248; расхода ресурсов – 0,342; стоимости выполнения работ – 0,298. В целях обоснования выбора типа ИСУ проведена серия из 20 экспериментов. Данное количество экспериментов является достаточным для применения критерия χ^2 , так как ожидаемая частота для каждой категории, соответствующей выбору типа ИСУ, составляет 10. Это значение превышает минимально допустимый порог в 5, что позволяет обеспечить статистическую значимость полученных результатов и повысить надежность выводов о предпочтительности того или иного типа ИСУ режимом ТСПГП.

Анализ полученных результатов и их обсуждение

На рисунке 4 представлены результаты выбора типа ИСУ, которые настроены как с участием ЛПР, так и без него, в рамках проведенных экспериментов по двум категориям: 1 – АП; 2 – НЛВ.

Анализ результатов выбора типа ИСУ показывает наличие различий в 45 % случаев, которые распределяются следующим образом: АП выбрана 17 и 12 раз соответственно для настроек без и с участием ЛПР, в то время как НЛВ была выбрана 3 и 8 раз в тех же условиях. Для интеллектуальных систем управления, настроенных без участия ЛПР, вычисленное значение критерия χ^2 составляет 9,8, тогда как для ИСУ, настроенных с участием ЛПР, это значение равно 0,8.

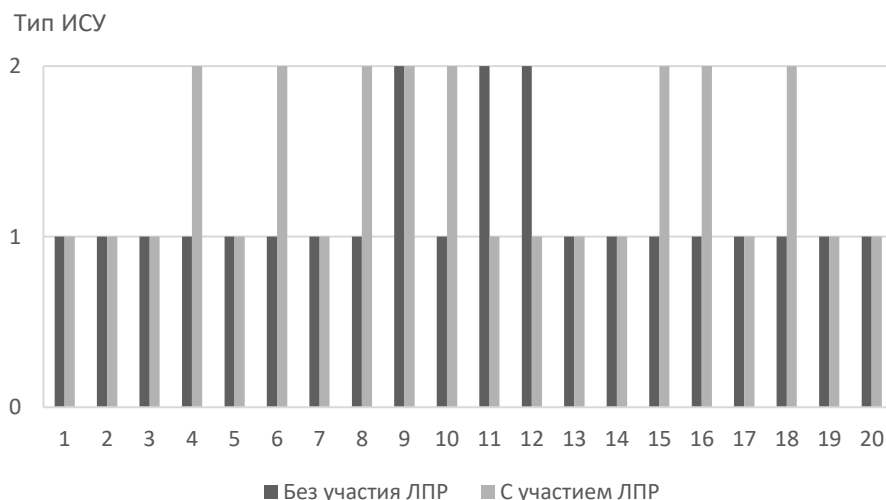


Рис. 4. Результаты выбора типа ИСУ по экспериментам

При установленном уровне значимости 0,05 критическое значение χ^2 составляет 3,84. Таким образом, выбор ИСУ с АП, настроенной без участия ЛПР, демонстрирует статистическую значимость по сравнению с выбором ИСУ с НЛВ. В то же время, между выбором типов ИСУ, настроенных с участием ЛПР, статистически значимых различий не обнаруживается. Следовательно, использование ИСУ, настроенных с участием ЛПР, способствует увеличению эффективности функционирования ТСПГП на 29,5 и 24 % при использовании АП и НЛВ соответственно. При отсутствии участия ЛПР эффективность возрастает до 49 и 46 % для тех же типов ИСУ.

Заключение

Для процессов производства гальванических покрытий, ключевыми факторами, способствующими повышению эффективности технологических систем, становятся процессы поддержки принятия решений и формирования управлений для ЛПР. Предложена методология, направленная на решение указанной проблемы через разработку проблемно-ориентированной СППР и ИСУ, а также их интеграцию в контур ТСПГП. Внедрение данных систем обеспечивает не только автоматизацию процессов, но и улучшение технико-экономических показателей функционирования ТСПГП, что достигается за счет реализации процессов принятия решений и формирования управлений при помощи методов и алгоритмов разработанной методологии, используемой при настройке систем. Таким образом, предложенная методология способствует созданию более устойчивой и предсказуемой среды для управления производственными системами, что в свою очередь ведет к оптимизации ресурсов и повышению конкурентоспособности предприятия.

Список литературы

1. Ishizuka, N. Topology optimization for unifying deposit thickness in electroplating process / N. Ishizuka, T. Yamada, K. Izui, S. Nishiwaki // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. – 2020. – Vol. 62. – P. 1767 – 1785. doi: 10.1007/s00158-020-02574-8
2. Numerical optimization of electrodeposition thickness uniformity with respect to the layout of anode and cathode / G. Yang, D. Deng, Y. Zhang, Q. Zhu, J. Cai // *Electrocatalysis*. – 2021. – Vol. 12. – P. 478 – 488. doi: 10.1007/s12678-021-00668-5
3. Разработка конструкции установки химического никелирования, функционирующей в составе гальванической линии / А. Б. Борисенко, В. В. Храмцов, В. А. Немтинов, А. В. Крылов, М. А. Матрохин // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2021. – Т. 27, № 2. – С. 275 – 284. doi: 10.17277/vestnik.2021.02.pp.275-284
4. Пчелинцева, И. Ю. Система распределенной обработки информации для решения задачи снижения неравномерности гальванических покрытий / И. Ю. Пчелинцева // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2022. – Т. 28, № 3. – С. 398 – 411. doi: 10.17277/vestnik.2022.03.pp.398-411
5. Санников, С. А. Системный анализ процесса проектирования линий для электрохимической и химической обработки деталей / С. А. Санников, В. Г. Мокрозуб, М. С. Калистратов // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2023. – Т. 29, № 1. – С. 6 – 16. doi: 10.17277/vestnik.2023.01.pp.006-016
6. Соловьев, Д. С. Формализация задачи и разработка алгоритма выбора метода нормализации данных для принятия решений / Д. С. Соловьев // *Вестн. Тамб.*

гос. техн. ун-та. – 2024. – Т. 30, № 1. – С. 17 – 27. doi: 10.17277/vestnik.2024.01.pp.017-027

7. 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

8. Соловьев, Д. С. Метод расчета коэффициентов компетентности участников группового принятия решений для выбора наилучшей альтернативы при мультивариантности результата / Д. С. Соловьев // Информатика и автоматизация. – 2024. – Т. 23, № 1. – С. 169 – 193. doi: 10.15622/ia.23.1.6

9. Соловьев, Д. С. Разработка и анализ интеллектуальной системы управления гальваническим процессом на базе ассоциативной памяти в условиях предсказуемой неопределенности / Д. С. Соловьев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2023. – Т. 24, № 11. – С. 573 – 582. doi: 10.17587/mau.24.573-582

10. Соловьев, Д. С. Разработка интеллектуальной системы с нечеткой стабилизацией управления в условиях неопределенности входных воздействий / Д. С. Соловьев // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2024. – № 1. – С. 38 – 45. doi: 10.24143/2072-9502-2024-1-38-45

Methodology of Decision-Making Support in Intelligent Control of Industrial Systems for Galvanic Coatings Production

D. S. Solovjev✉

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

Keywords: intelligent control system; methodology; uncertainty; decision support system; technological systems for the production of galvanic coatings; human factor.

Abstract: The article describes the reasons for uncertainty causing a decrease in the efficiency of industrial systems for galvanic coatings production. The proposed methodology is used to create problem-oriented systems for decision-making support and intelligent control under uncertainty to improve the efficiency of industrial systems for the galvanic coatings production. The relationship between the principles of the system approach, methods and algorithms that form the proposed methodology is given. The architecture is demonstrated, and the algorithmic support of the systems is described.

References

1. Ishizuka N., Yamada T., Izui K., Nishiwaki S. Topology optimization for unifying deposit thickness in electroplating process, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2020, vol. 62, pp. 1767–1785. doi: 10.1007/s00158-020-02574-8

2. Yang G., Deng D., Zhang Y., Zhu Q., Cai J. Numerical optimization of electrodeposition thickness uniformity with respect to the layout of anode and cathode, *Electrocatalysis*, 2021, vol. 12, pp. 478–488. doi: 10.1007/s12678-021-00668-5

3. Borisenko A.B., Khramtsov V.V., Nemtinov V.A., Krylov A.V., Matrokhin M.A. [Designing a chemical nickel plating unit operating as part of a galvanic line], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2021, vol. 27, no. 2, pp. 275-284. doi: 10.17277/vestnik.2021.02.pp.275-284 (In Russ., abstract in Eng.)
4. Pchelintseva I.Yu. [A distributed information processing system to solve the problem of reducing electroplating unevenness], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2022, vol. 28, no. 3, pp. 391-411. doi: 10.17277/vestnik.2022.03.pp.398-411 (In Russ., abstract in Eng.)
5. Sannikov S.A., Mokrozub V.G., Kalistratov M.S. [System analysis of the design process of lines for electrochemical and chemical processing of parts], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2023, vol. 29, no. 1, pp. 6-16. doi: 10.17277/vestnik.2023.01.pp.006-016 (In Russ., abstract in Eng.)
6. Solovjev D.S. [Formalization of the problem and development of an algorithm for selecting a data normalization method for decision making support], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2024, vol. 30, no. 1, pp. 17-27. doi: 10.17277/vestnik.2024.01.pp.017-027 (In Russ., abstract in Eng.)
7. Solovjev D.S. [The objectification method of the weight coefficients for decision-making in multicriteria problems], *Nauchno-tehnicheskij 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.)
8. Solovjev D. [Competence coefficients calculation method of participants in group decision-making for selecting the best alternative with the multivariate of the result], *Informatika i avtomatizaciya. [Informatics and Automation]*, 2024, vol. 23, no. 1, pp. 169-193. doi: 10.15622/ia.23.1.6 (In Russ., abstract in Eng.)
9. Solovjev D.S. [Development and analysis of an intelligent electroplating control system based on associative memory under conditions of predictable uncertainty], *Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie. [Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie]*, 2023, vol. 24, no. 11. pp. 573-582. doi: 10.17587/mau.24.573-582 (In Russ., abstract in Eng.)
10. Solovjev D.S. [Development of a fuzzy stabilization control intelligent system under conditions of input influences uncertainty], *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika. [Vestnik of Astrakhan state technical university. Series: management, computer science and informatics]*, 2024, no. 1, pp. 38-45. doi: 10.24143/2072-9502-2024-1-38-45 (In Russ., abstract in Eng.)

Methodik zur Entscheidungsunterstützung für die intelligente Steuerung der technologischen Systeme der galvanischen Beschichtungsproduktion

Zusammenfassung: Es ist die Beschreibung der Gründe für die Unsicherheit gegeben, die zu einer Verschlechterung der Funktionseffizienz technologischer Systeme zur Herstellung galvanischer Beschichtungen führt. Betrachtet und analysiert ist die Methodik zur Schaffung problemorientierter Entscheidungsunterstützungssysteme und intelligenter Steuerung unter Unsicherheitsbedingungen zur Verbesserung der Funktionseffizienz technologischer Systeme zur Herstellung galvanischer Beschichtungen. Die Beziehung zwischen den Prinzipien des Systemansatzes, den Methoden und Algorithmen, die die vorgeschlagene Methodik bilden, ist dargestellt.

Die Architektur wird demonstriert und die algorithmische Unterstützung der Systeme ist beschrieben.

Méthodologie d'aide à la décision dans la gestion intelligente des systèmes technologiques des revêtements de galvanoplastie

Résumé: Est donnée une description des raisons de l'incertitude qui entraîne une diminution de l'efficacité des systèmes technologiques de production des revêtements de galvanoplastie. Est examinée et analysée la méthodologie pour la création des systèmes d'aide à la décision et de contrôle intelligent axés sur les problèmes dans des conditions d'incertitude afin d'améliorer l'efficacité des systèmes technologiques de la production des revêtements de galvanoplastie. Est présentée la relation entre les principes de l'approche systémique, les méthodes et les algorithmes qui forment la méthodologie proposée. Est démontrée l'architecture et sont décrits les systèmes algorithmiques.

Автор: *Соловьев Денис Сергеевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры математического моделирования и информационных технологий, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина», Тамбов, Россия.

A MATHEMATICAL MODEL FOR PREDICTING FAILURES OF A SELF-CONTAINED SELF-RESCUER

V. G. Matveykin, P. K. Praveen, B. S. Dmitrievsky, A. A. Terekhova✉

*Department of Information Processes and Control, terekhova.aa@mail.tstu.ru;
TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: grey Markov model; mathematical model; prediction; SCSR failure; self-contained self-rescuer; Smart and automated SCSR; system state.

Abstract: Mining is one the most hazardous industries in the world. There are various means of safety which safeguard the miners working underground, with self-contained self-rescuer being one of them. In this article, the grey Markov SCGM (1,1)c model has been used to predict the failure of SCSRs due to human error. It is taken into account that SCSR failures are dynamic in nature and the model is adjusted to improve accuracy. The criterion of state separation is obtained, and the matrix of the probability of state transition is given. The accuracy of the proposed model has been verified. It is suggested by this article that the time has come to develop and use smart and automated SCSRs that can diagnose the faults themselves and help the miners during the escape.

Introduction

Self-contained self-rescuers (SCSR) are devices used by miners to evacuate themselves in the event of an emergency in a mine. There are two types of SCSRs: 30-minute and 60-minute, each of which is used once.

Compliance with norms and standards is a key factor in ensuring the safety of miners [1, 2]. According to the adopted norms, strict selection and quality testing of SCSRs is required. The tests are divided into laboratory tests – 50 % of the samples (minimum 6 units) are tested in an accredited laboratory according to the IS15803-2008 standard and practical tests, when the remaining SCSR samples undergo a performance test under conditions close to real ones, for example, at a rescue station. SCSR testing parameters and their limit values are given in Table 1.

Even if the above provisions are met, there is still a possibility that the device may fail during actual use or emergency use due to various reasons including human error.

Mathematical modeling Mathematical model selection

A large number of papers are devoted to mathematical modeling [3 – 12]. We use the grey Markov SCGM (1,1)c prediction model to study or predict the failures of SCSRs in emergency situations arise due to human error in the care and maintenance of SCSRs

[13 – 15]. We have selected the grey Markov model to forecast or assess the errors due to following reasons:

1. Error is not regular and it cannot be generalized.
2. It is randomly scattered.
3. Information on raw data is limited.

Table 1

SCSR test parameters and limit values

Parameter	Acceptance Level
Rated Duration (as per label)	Not less than 90 % of the specified duration
Inhalation Oxygen Concentration (% by vol.)	Not less than 21*
Inhalation Carbon Dioxide Concentration (% by vol.)	Not more than 1.5**
Maximum inhalation temperature dry bulb	Not more than 55 °C
Inhalation breathing resistance	Not more than 10 mbar
Exhalation breathing resistance	

* A short term deviation to a level of not less than 17 % for a period of not more than two minutes at the beginning of the test is permissible.

** Throughout the rated duration of the apparatus, carbon dioxide concentration of the inhaled air shall not exceed 3.0% (by volume).

4. Information is not valid for all the stake holders (for all the mining companies or mining players); hence we can say that information is neither perfect and nor certain.

Every mining company is not weak on budgets, hence it is very difficult to model such scenarios based on a probabilistic statistical model or mathematical statistics methods. The grey Markov SCGM (1,1)c is quite suitable for complex mathematical models.

Mathematical model development

Since human errors cannot be generalized, we can say that the error data is random. Taking into consideration of randomness of data, failure of SCSRs in time series $x^{(0)}$ can be expressed as

$$x^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\}. \quad (1)$$

First, $x^{(0)}$ is integrated as follows, where

$$\bar{x}^{(1)} = \{\bar{x}^{(1)}(2), \bar{x}^{(1)}(3), \dots, \bar{x}^{(1)}(n)\}; \quad (2)$$

$$\bar{x}^{(1)}(k) = \sum_{m=2}^k \bar{x}^{(1)}(m), \quad k = 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

$\bar{x}^{(0)}$ is a close mean value generated sequence for $\bar{x}^{(0)}$

$$\bar{x}^{(1)} = \{\bar{x}^{(1)}(2), \bar{x}^{(1)}(3), \dots, \bar{x}^{(1)}(n)\}; \quad (4)$$

where

$$\bar{x}^{(1)}(k+1) = \frac{x^{(0)}(k+1) + x^{(0)}(k)}{2}. \quad (5)$$

Random human errors in maintenance of SCSRs can lead to the failures of SCSRs; such failures of SCSRs are dynamic in nature and given that the integral sequence of

failures of SCSRs time series is expressed as $\{x^{(0)}(k)\}$ that is associated with satisfaction trend of non-homogeneous index discrete-function expressed as

$$f_r(k) = be^{a(k-1)} - c.$$

Thus the data of $x^{(1)}(k)$ is fit to $f_r(k)$

According to the grey system cloud prediction method, the grey system SCGM (1,1)c prediction model can be expressed as

$$\frac{dx^{(1)}(k)}{dk} = ax^{(1)}(k) + u, \quad k \geq 2. \quad (6)$$

Its time response function can be expressed as follows

$$x^{(1)}(k) = \left[x^{(1)}(1) + \frac{U}{a} \right] e^{ak} - \frac{U}{a}, \quad (7)$$

where

$$a = \frac{\ln \sum_{k=2}^n x^{(0)}(k-1)x^{(0)}(k)}{\sum_{k=2}^n (x^{(0)}(k-1))^2}; \quad (8)$$

$$b = \frac{(n-1) \sum_{k=2}^n e^{a(k-1)} \bar{x}^{(1)}(k) - \left(\sum_{k=2}^n e^{a(k-1)} \right) \left(\sum_{k=2}^n \bar{x}^{(1)}(k) \right)}{(n-1) \sum_{k=2}^n e^{2a(k-1)} - \left(\sum_{k=2}^n e^{a(k-1)} \right)^2}; \quad (9)$$

$$c = \frac{1}{n-1} \left[\left(\sum_{k=2}^n e^{a(k)} \right) b - \sum_{k=2}^n \bar{x}^{(1)}(k) \right]. \quad (10)$$

If, $\bar{x}^{(1)}(1) = b - c$, $U = ac$, $\bar{x}^{(1)}(k)$ is reverted, the grey system SCGM (1,1)c prediction model in originality can be expressed as

$$\hat{x}^{(0)}(k) = \frac{2b(1 - e^{-a})}{1 + e^{-a}} e^{a(k-1)}. \quad (11)$$

Then, the grey precision index $Y(k)$, residual error $\varepsilon(k)$ and the relative error Δk can be calculated as follows:

$$Y(k) = \frac{x^0(k)}{x^{(0)}(k)}; \quad (12)$$

$$\varepsilon(k) = \hat{x}^{(0)}(k) - x^0(k); \quad (13)$$

$$\Delta k = \frac{|\varepsilon(k)|}{x^0(k)}. \quad (14)$$

Equations (12) – (14) are the indicators of the grey fitting accuracy, which also reflect the degree of deviation in the predicted values to the original set of data.

Amended residual SCGM (1,1)c model to predict failures in SCSRs

The data for statistics of the failures of SCSRs due to non-maintenance could be larger and as a human's behaviour is highly uncertain, therefore, regularity can be weak in nature or may not be very strong. Hence, it is incorrect to predict accuracy based only on SCGM(1,1)c in order to predict SCSR failures due to human errors in SCSR maintenance. In order to improve the accuracy of the prediction rate and meet closely to the actual situation, the model is corrected to improve the accuracy. The amended principle and steps are as follows:

1. The first time residuals data sequence has the following predicted value and the actual value, respectively:

$$\varepsilon^{(0)}(k) = \hat{x}^{(0)}(k) - x^0(k), \quad k = 1, 2, \dots, n; \quad (15)$$

$$\varepsilon^{(0)}(k) = \{\varepsilon^0(1), \varepsilon^0(2), \dots, \varepsilon^0(n)\}. \quad (16)$$

2. Processing residuals correction sequence is as follows, if

$$M = (1 + e^{-a})^{-1} (1 - e^{-a})^b,$$

then the SCGM (1,1) prediction can be expressed as

$$\hat{x}^{(0)}(k) = 2e^{a(k-1)}M.$$

If $\varepsilon^{(0)}(k) \geq 0$, $k = 1, 2, \dots, n$, the SCGM (1,1)c model can be expressed as

$$\hat{\varepsilon}^{(0)}(k) = 2e^{a_1(k-1)}M_1$$

and a_1, b_1 and M_1 can be obtained in the same manner as a, b and M as earlier used method.

Hence, the first time residual corrected SCGM (1,1)c model can be expressed as

$$\hat{x}_{\varepsilon_1}^{(0)}(k) = 2(e^{a(k-1)}M - e^{a_1(k-1)}M_1). \quad (17)$$

If $\varepsilon^{(0)}(k) < 0$, $k = 1, 2, \dots, n$, the first time residuals corrected SCGM (1,1)c model can be expressed as

$$\hat{x}_{\varepsilon_1}^{(0)}(k) = 2(e^{a(k-1)}M + e^{a_1(k-1)}M_1). \quad (18)$$

If the first time the residuals amendment could not meet the accuracy of the required forecast, a second residual correction shall be carried out and so on until the required accuracy requirements are met.

The residual correction generic model can be expressed as

$$\hat{x}_{\varepsilon_2}^{(0)}(k) = \hat{x}_{\varepsilon_1}^{(0)}(k) - 2e^{a_2(k-1)}M_2, \quad (19)$$

where

$$\varepsilon_1 \varepsilon^{(0)}(k) \geq 0, \quad k = 1, 2, \dots, n,$$

and

$$\hat{x}_{\varepsilon_2}^{(0)}(k) = \hat{x}_{\varepsilon_1}^{(0)}(k) + 2e^{a_2(k-1)}M_2, \quad (20)$$

where

$$\varepsilon_1^{(0)}(k) \leq 0, \quad k = 1, 2, \dots, n.$$

Amended Markov SCGM (1,1)c model for prediction of failures in SCSRs

The curve that we obtained as a result of forecasting SCGM(1,1)c is, in fact, an exponential curve, and the result of forecasting is a smooth curve. Since, human errors are the main part of the failures of SCSRs, the SCGM (1,1)c model solely applied cannot meet the required accuracy for the forecast. Markov's theories have no aftereffect, that is to say, the future of the system is only related to the current state and there is no effect from the past state. Meanwhile, the Markov model is adopted to predict state trends through the transfers of probability which it can adapt to the randomness and variability of the state. Application of Markov theory to make corrections in the SCGM (1,1)c prediction model of failure of SCSRs due to non-maintenance as a human error can better solve the variability and randomness in maintenance of SCSRs caused by human errors to improve the prediction accuracy.

State divided criterion for the prediction of failures in SCSRs

Failures in SCSRs due to non-maintenance could change annually and are dynamic non-stationary random process. Therefore, the indicators of precision fitting the prediction shall also be variable and random as the boundary and connotation of the different annual states can change. Hence, an adaptive state divided criterion needs to be obtained, and the criterion should be consistent with the basic timing trend of the Failures of SCSRs due to non-maintenance.

Hence, k was divided into m states, and each state can be expressed as

$$E_i \in [\varepsilon_{1i}, \varepsilon_{2i}], \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (21)$$

where

$$\varepsilon_{1i} = Y(k) + A_i; \quad \varepsilon_{2i} = Y(k) + B_i,$$

E_i is expressed as i state, ε_{1i} and ε_{2i} are, respectively, expressed as the upper and lower bounds of the i state, A_i and B_i are constants determined according to prediction data.

Since k is a time function, ε_{1i} and ε_{2i} will be changed with time, so the state possesses variability.

When we say that the state is divided, the numbers of different intervals can be reasonably divided according to the actual situation. If our raw data will be less, the interval division shall be less to increase the number of transfers between the various states, and thus the transfer law shall be more objectively reflected between states.

Conversely, if raw data will be more, the interval division shall be less to excavate more information from a large number of data to improve the prediction accuracy. It will be suitable to adapt the clustering classification method to determine class number and classification intervals due to fewer data and the uncertain status of failures of SCSRs due to non-maintenance as a human error.

Developing state transition rate matrix for the prediction of failures in SCSRs

Let the original number of samples is expressed as s $M_{ij}(k)$ from the state E_i transiting to the state E_j by k step, and the number of occurrences of the state E_i is expressed as M_i , so state transition probability can be expressed as

$$\bar{P}_{ij}(k) = \frac{M_{ij}(k)}{M_i}, \quad i, j = 1, 2, \dots, \bar{M}, \quad (22)$$

$M \times M$ state transition probability matrix can be obtained as

$$P(k) = \begin{bmatrix} P_{11}(k) & P_{12}(k) & \cdots & P_{13}(k) \\ P_{21}(k) & P_{22}(k) & \cdots & P_{23}(k) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{m1}(k) & P_{m2}(k) & \cdots & P_{m3}(k) \end{bmatrix}. \quad (23)$$

Determining the predictive value for the prediction of failures in SCSRs

The state transition probability matrix k reflects all statistical regularities of state transition, and the future system state steering can be predicted by investigating the matrix. In the actual analysis of the process, one step transition probability matrix is generally only examined. Given that predicted moment object is in the state E_k , investigating the k row of (1) can get the following below results;

1. If $\max P_{ij} = P_{kl}$, the next time system should most likely shift from the state E_k to the state E_l .

2. If there are two or more probability values identical or similar to k row in the matrix $P(1)$, the future state steering will be difficult to determine; it needs to consider probability transition matrix $P(2)$ or $P(n)$ ($n \geq 3$).

The system's future state is determined by investigating the state transition probability matrix, and the grey change interval of relative prediction value in the future moments will also be determined; it can be expressed as $[\varepsilon_{1i}, \varepsilon_{2i}]$. The predicted value of the future moment can be expressed as the interval median as $Y'(k)$

$$Y'(k) = \frac{x^0(k)}{x^{(0)}(k)} = \frac{1}{2}(\varepsilon_{1i} + \varepsilon_{2i}) = Y(k) \frac{1}{2}(A_i + B_i). \quad (24)$$

Error analysis

In order to examine the precision and accuracy of the proposed model, ground tests are required to determine the error between the forecast value and actual value. In this study, we use the relative percentage error (RPE) analysis to assess the model precision and accuracy.

Relative percentage error analysis

Relative percentage error compares the real and predicted values at specific time k . The RPE is defined as equation (14). The total model precision can be defined by average relative percentage error (ARPE) as below

$$ARPE = -\sum_{k=1}^n RPE, \text{ where } k = 2, 3, 4. \quad (25)$$

Analysis

A field study shall be able to determine the accuracy of the model. Since the field data is very difficult to get and study cannot be carried out, this mathematical model is accurate and it will determine the desired results.

We simulate a data point of one of the cluster of mines with 2500 employees going underground every day to check the accuracy of the SCGM (1,1)c mathematical model. This cluster of mines has a total of 2500 units of SCSRs, but they are not maintained to proper safety standards or there is a human negligence in maintaining those SCSRs. On forceful annual check or during the escape exercise annually, the rate of failure of SCSRs is illustrated below. The number of failed SCSRS in one of the mines from 2018 to 2022 are shown in Table 2.

Table 2

Values of failed SCSRs in one of the mines from 2018 to 2022

No.	Year	Annual failure of SCSRs
1	2018	54
2	2019	50
3	2020	52
4	2021	55
5	2022	47

Analysis based on SCGM (1,1)c prediction model

Based on the above data and calculations done on MATLAB, the values for *a* and *b* were 0.0072 and 7.359e + 03, respectively, then the grey prediction model was established. The obtained data from SCGM (1,1)c analysis of data with grey precision index are shown in Table 3.

Table 3

SCGM (1,1)c analysis of data with grey precision index

No.	Year	Real value	Prediction value	Relative error	Grey precision index, %
1	2018	54	52.93	0.01	102
2	2019	50	52.55	0.05	95
3	2020	52	52.18	0.003	99
4	2021	55	51.81	0.05	106
5	2022	47	51.44	0.09	91

Analysis of results based on SCGM (1,1)c prediction model

The analysis of results based on SCGM (1,1)c prediction model suggests that if the negligence on the maintenance of SCSRs due to human error happens, it results into the SCSRs failures. The grey precision index suggests that it can predict close to accurate results for the SCSRs failure or the said conditions.

This analysis implies that on an average 50 people are at risk of carrying failed SCSRs, which might not work or might not work in full capacity during the actual escape. Accidents in the mines cannot be assessed in advance and people working underground if they are carrying failed SCSRs; they are risking their lives and it can result into big fatal accident.

Conclusion

Mines are vulnerable to accidents and people’s safety becomes one of the priority assignments in case of mine accidents. With the help of an appropriate SCSR, a person can easily escape in various accident conditions such as influx of toxic gases or increase in explosive gases or when the mine environment has become suffocating. Given the life of the apparatus which is 10 years and maintaining such apparatus manually for such long period and following all the norms of the regulatory authority is a daunting task although it is in the benefit of the people.

Therefore, the time has come to think beyond to use a SCSR which is smart and which need not to be monitored all the time which can diagnose the faults by itself and can raise alarm in case of any fault. By using such SCSRs, miners can always be updated of the health of the SCSRs and it will give ultimate confidence to their preparedness of self-escape.

References

1. Matveykin V.G., Nemtinov V.A., Dmitrievsky B.S., Praveen P.K.: Development and implementation of network based underground mines safety, rescue and aided rescue system, *J. Phys: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1278, no. 1, pp. 012017, doi: 10.1088/1742-6596/1278/1/012017
2. Matveykin V., Samarin V., Nemtinov V., Dmitrievsky B., Praveen P.K. Design Theory of Network Based Smart Self-Contained Self-Rescuer with Sensor Technology. *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies (EMMFT 2019)*, 2020, vol. 2, pp. 178-186, doi: 10.1007/978-3-030-57453-6_15
3. Bityukov V.K., Emel'yanov A.E. [Generalized Mathematical Model of a Network Control System with a Competing Access Method], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 2, pp. 319-326. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Kudryashov V.S., Tikhomirov S.G., Ryazantsev S.V., Ivanov A.V., Kozenko I.A. [Simulation method of a multiply-connected digital system for controlling ammonia synthesis], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 4, pp. 572-580, doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.572-580 (In Russ., abstract in Eng.)
5. Popov N.S., Luzgacheva N.V., Chan M.T. [To the method of constructing an expert system for assessing industrial safety], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2013, vol. 19, no. 1, pp. 43-51. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Serov A.Yu., Smorgonskij A.V. [Acting computer model of the manufacturing enterprise], *Ekonomika i matematicheskie metody* [Economics and mathematical methods], 2009, vol. 45, no. 3, pp. 40-47. (In Russ., abstract in Eng.)
7. Dmitrievsky B.S. [Business management model for planning knowledge-intensive enterprise], *Pribory i Sistemy. Upravleniye, Kontrol', Diagnostika* [Instruments and Systems. Management, Control, Diagnostics], 2007, no. 5, pp. 66-68. (In Russ., abstract in Eng.)
8. Saif M.N.M., Matveykin V.G., Dmitrievsky 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.053-062 (In Russ., abstract in Eng.)
9. Panchenko I.S. *Extended abstract of Candidate's of Engineering thesis*, Tambov, 2012, 16 p. (In Russ.).
10. Dzhambekov A.M., Shcherbatov I.A. [Optimal control of the catalytic reforming process of gasoline fractions], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 4, pp. 557-571, doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.557-571 (In Russ., abstract in Eng.)
11. Saif M.H.M., Matveykin V.G., Dmitrievsky B.S., Bashkatova A.V., Mamontov A.A. [Control of Objects with Interrelated Values], *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., Dmitrievsky B.S., Panchenko I.S. Designing a management system for an innovation-production system, *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2011, vol. 17, no. 2, pp. 289-296. (In Russ., abstract in Eng.)

13. Jiang X.-C., Chen S.-F. Application of Weighted Markov SCGM(1,1)c Model to Predict Drought Crop Area, *Systems Engineering – Theory & Practice*, 2009, vol. 29, no. 9, pp. 179-185, doi: 10.1016/S1874-8651(10)60072-5

14. Wang J., Liang D., Xu Y., Luo Y., Zhang W., Guo Q., Xia W., Zeng G. The research of the application of grey Markov SCGM (1,1) model in the prediction of source water quality, *Proc. 2nd International Conference on Applied Mathematics, Modelling, and Intelligent Computing (CAMMIC 2022)*, 2022, vol. 12259. doi: 10.1117/12.2641081.

15. Azadeh A., Ghaderi S.F., Sohrabkhani S. A simulated-based neural network algorithm for forecasting electrical energy consumption in Iran, *Energy Policy*, 2008, vol. 36, no. 7, pp. 2637-2644, doi: 10.1016/j.enpol.2008.02.035

Математическая модель прогнозирования отказов автономного самоспасателя

В. Г. Матвейкин, П. К. Правин, Б. С. Дмитриевский, А. А. Терехова✉

*Кафедра «Информационные процессы и управление», terehova.aa@mail.tstu.ru;
ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: скрытая марковская модель; математическая модель; прогнозирование; отказ SCSR; автономный самоспасатель; интеллектуальный и автоматизированный SCSR; состояние системы.

Аннотация: Одной из самых опасных отраслей промышленности на планете является горнодобывающая. Существуют различные средства безопасности, защищающие шахтеров, работающих под землей, среди которых следует выделить автономный самоспасатель. Использована скрытая марковская модель и модель формирования кластеров для прогнозирования отказа автономных самоспасателей из-за человеческой ошибки. Принимается во внимание, что отказы автономного самоспасателя носят динамический характер, и модель корректируется для повышения точности. Получен критерий разделения состояний и дана матрица вероятности перехода состояний. Проверена точность предложенной модели. Предполагается, что необходимо разработать и использовать интеллектуальные и автоматизированные самоспасатели, которые могут сами диагностировать неисправности и помогать шахтерам во время эвакуации.

Список литературы

1. Matveykin, V. G. Development and implementation of network based underground mines safety, rescue and aided rescue system / V. G. Matveykin, V. A. Nemtinov, B. S. Dmitrievsky, P. K. Praveen // *J. Phys: Conf. Ser.* – 2019. – Vol. 1278, No. 1. – P. 012017. doi: 10.1088/1742-6596/1278/1/012017

2. Design Theory of Network Based Smart Self-Contained Self-Rescuer with Sensor Technology / V. Matveykin, V. Samarin, V. Nemtinov [et al.] // *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies (EMMFT 2019)*. – 2020. – Vol. 2. – P. 178 – 186. doi: 10.1007/978-3-030-57453-6_15

3. Битюков, В. К. Обобщенная математическая модель сетевой системы управления с конкурирующим методом доступа / В. К. Битюков, А. Е. Емельянов // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та.* – 2012. – Т. 18, № 2 – С. 319 – 326.

4. Метод моделирования многосвязной цифровой системы управления процессом синтеза аммиака / В. С. Кудряшов [и др.] // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та.* – 2017. – Т. 23, № 4. – С. 572 – 580. doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.572-580

5. Попов, Н. С. К методике конструирования экспертной системы оценки промышленной безопасности / Н. С. Попов, Н. В. Лузгачева, М. Т. Чан // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2013. – Т. 19, № 1. – С. 43 – 51.
6. Серов, А. Ю. Действующая компьютерная модель производственного предприятия / А. Ю. Серов, А. В. Сморгонский // Экономика и математические методы. – 2009. – Т. 45, № 3. – С. 40 – 47.
7. Дмитриевский, Б. С. Бизнес-модель управления планированием на наукоемком предприятии / Б. С. Дмитриевский // Приборы и Системы. Управление, Контроль, Диагностика. – 2007. – № 5. – С. 66 – 68.
8. 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.053-062
9. Панченко, И. С. Математическое моделирование и алгоритмизация организационно-технологических систем, производящих инновационную продукцию : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / И. С. Панченко. – Тамбов, 2012. – 16 с.
10. Джембеков, А. М. Оптимальное управление процессом каталитического риформинга бензиновых фракций / А. М. Джембеков, И. А. Щербатов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 4. – С. 557 – 571. doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.557-571
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. Матвейкин, В. Г. Проектирование системы управления инновационно-производственной системой / В. Г. Матвейкин, Б. С. Дмитриевский, И. С. Панченко // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 17, № 2. – С. 289 – 296.
13. Jiang, X.-C. Application of Weighted Markov SCGM(1,1)c Model to Predict Drought Crop Area / X.-C. Jiang, S.-F. Chen // Systems Engineering – Theory & Practice. – 2009. – Vol. 29, No. 9. – P. 179 – 185, doi: 10.1016/S1874-8651(10)60072-5
14. The research of the application of grey Markov SCGM (1,1) model in the prediction of source water quality / J. Wang, D. Liang, Y. Xu [et al.] // Proc. 2nd International Conference on Applied Mathematics, Modelling, and Intelligent Computing (CAMMIC 2022). – 2022. – Vol. 12259. doi: 10.1117/12.2641081.
15. Azadeh, A. A simulated-based neural network algorithm for forecasting electrical energy consumption in Iran / A. Azadeh, S.F. Ghaderi, S. Sohrabkhani // Energy Policy. – 2008. – Vol. 36, No. 7. – P. 2637 – 2644, doi: 10.1016/j.enpol.2008.02.035

Mathematisches Modell zur Vorhersage von Fehlern autonomer Selbstretter

Zusammenfassung: Einer der gefährlichsten Industriezweige der Welt ist der Bergbau. Es gibt verschiedene Sicherheitsausrüstungen zum Schutz der unter Tage arbeitenden Bergleute, von denen der autonome Selbstretter hervorgehoben werden sollte. Das Gray-Markov- und SCGM-Modell ist zur Vorhersage des Versagens von Scars aufgrund von menschlichem Versagen verwendet. Es wird berücksichtigt, dass SCSR-Ausfälle dynamischer Natur sind, und das Modell wird angepasst, um die Genauigkeit zu verbessern. Das Zustandstrennungskriterium ist ermittelt und die Zustandsübergangswahrscheinlichkeitsmatrix ist angegeben. Die Genauigkeit des vorgeschlagenen Modells ist überprüft. Es ist vorgeschlagen, intelligente und automatisierte Selbstrettungsgeräte zu entwickeln und einzusetzen, die Fehler selbst diagnostizieren und Bergleute bei der Evakuierung unterstützen können.

Modèle mathématique de la prédiction de l'échec de l'auto-sauveteur autonome

Résumé: Une des industries les plus dangereuses de la planète est l'exploitation minière. Il existe différents moyens de sécurité pour protéger les mineurs travaillant sous terre, parmi lesquels il convient de souligner l'auto-sauveteur autonome. Sont utilisés le modèle caché de Gray Markov et le modèle de la formation des clasters pour prédire l'échec de Scars en raison d'une erreur humaine. Attendu que les défaillances SCSR sont dynamiques et que le modèle est ajusté pour améliorer la précision. Est obtenu le critère de la séparation des états; est donnée la matrice de probabilité de transition des états. Est vérifiée la précision du modèle proposé. Il est supposé qu'il est nécessaire de développer et d'utiliser des auto-sauveteurs intelligents et automatisés capables de diagnostiquer eux-mêmes les dysfonctionnements et d'aider les mineurs pendant l'évacuation.

Авторы: *Матвейкин Валерий Григорьевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные процессы и управление»; *Правин Правин Кумар* – аспирант кафедры «Информационные процессы и управление», *Дмитриевский Борис Сергеевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные процессы и управление»; *Терехова Анастасия Андреевна* – аспирант кафедры «Информационные процессы и управление», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

ПЛАНИРОВАНИЕ ОСТАНОВОЧНЫХ РЕМОНТОВ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

С. Я. Егоров^{1✉}, В. А. Немтинов¹, И. А. Авцинов²

*Кафедра «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении» (1),
egorovsky@yandex.ru, ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия;
кафедра автоматизированных систем управления процессами и производствами (2),
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»,
Воронеж, Россия*

Ключевые слова: календарное планирование; остановочный ремонт; постановка задачи; система технического обслуживания; сетевая модель.

Аннотация: Рассмотрены особенности предприятий химической промышленности, влияющие на организацию и проведение ремонта технологического оборудования. Особое внимание уделено ремонтам, выполнение которых связано с частичной или полной остановкой производства, а также планированию остановочных ремонтов. Выделено семь типов ремонтов, соответствующих термину «остановочный ремонт». Представлены три основных этапа планирования: формирование производственного задания на ремонт; разработка сетевой модели ремонта и разработка системы материально-технического снабжения ремонтов. Дано описание постановки задачи календарного планирования остановочных ремонтов и ее решения. Ввиду сложности прямого решения задачи предложен итерационный подход, при котором решение основной задачи заменяется решением ряда более простых задач, имеющих самостоятельное значение. Полученные результаты реализованы при разработке системы календарного планирования остановочных ремонтов. Применение системы возможно для любых типов производств, связанных с проведением остановочных ремонтов, что подтверждено примером расчета.

Введение

Особенность химических производств – широкий ассортимент получаемой продукции, включающий сотни наименований. Технологические процессы, применяемые на химических производствах, состоят из чисто химических процессов (восстановления, окисления, нитрования и др.), физико-химических (выпаривания, кристаллизации, сушки и др.), термохимических и электрохимических. Отдельные технологические процессы и производственный процесс в целом на химических производствах отличаются большой сложностью. Это обусловлено тем, что они протекают при повышенном или пониженном давлении, высоких или низких температурах. Около 85 % химических производств основываются на применении катализаторов или инициаторов. Технологическое оборудование и машины, в которых осуществляются данные процессы, представляют собой, в основном, специализированные сосуды и аппараты, работающие как в непрерывных, так и периодических режимах. Сложные условия проведения технологических процессов и высокие требования к качеству выпускаемых продуктов тре-

буют безупречной работы оборудования, что в свою очередь невозможно без его своевременного ремонта.

Под понятием «ремонт» понимается комплекс работ для поддержания и восстановления работоспособности оборудования. В настоящее время существует несколько подходов к ремонту оборудования на промышленных объектах. Наиболее часто используется система планово-предупредительных ремонтов (ППР) [1 – 5], предусматривающая два метода ремонта: планово-периодический – для основного оборудования, и послеосмотровой (по текущему состоянию) – для вспомогательного оборудования. В работе [5] дан обзор систем технического обслуживания и ремонта (ТОРО) и их интеграции в системы управления основными фондами предприятия.

Некоторые предприятия отказались от системы ППР, так как считают неверным использование устаревших нормативов и нерациональным с точки зрения затрат на ремонт. Оборудование на таких производствах ремонтируется по его текущему состоянию. В этом случае план ремонта основан как на текущем состоянии оборудования, так и на его реальной эксплуатационной нагрузке [6 – 9]. Подробная информация о состоянии оборудования позволяет определить наиболее оптимальный момент для ремонта и предупреждает о возможных проблемах. Так, в работе [9] рассматривается инновационная концепция ремонта оборудования по техническому состоянию, основанная на использовании интегрированных систем диагностики и планировании ремонтов оборудования на химических предприятиях, обеспечивающих непрерывный мониторинг за его состоянием. Такой подход позволяет значительно увеличить эффективность использования ресурсов и снизить затраты на ремонт оборудования.

Заслуживает внимания подход к ремонту на основе использования предиктивного обслуживания оборудования [10 – 12], который заключается в том, что на оборудование устанавливаются датчики (вибрации, температуры, давления), которые постоянно снимают информацию и передают ее на обработку, что позволяет по незначительным изменениям контролируемых параметров предсказать время выхода оборудования из строя.

Указанные подходы частично решают задачу поддержания оборудования в работоспособном состоянии, но они не дают ответа на вопросы организации и проведения ремонтов более высокого уровня, затрагивающих интересы оптимального функционирования как отдельных схем, так и в целом всего производства, цеха, завода. Как правило, такие ремонты связаны с полным прекращением работы объекта или системы и получили название «остановочный ремонт» [13]. Это, прежде всего, предприятия химической и пищевой промышленности, выпуск продукции на которых ведется по непрерывной технологии. Объекты нефтедобывающей и газовой промышленности, городские системы снабжения теплом, газом, водой. *Цель работы* – рассмотрение вопросов, связанных с организацией планирования и проведения остановочных ремонтов.

Классификация основных типов остановочных ремонтов производств

При анализе различных ремонтных работ на таких производственных объектах можно выделить несколько основных видов, которые останавливают производство (рис. 1):

- 1) капитальный ремонт основного оборудования, когда проводится замена или ремонт ключевых элементов оборудования, результат которого – полное восстановление работоспособности оборудования. Если в схеме нет резервного аппарата, то это приводит к остановке работы всего производства;

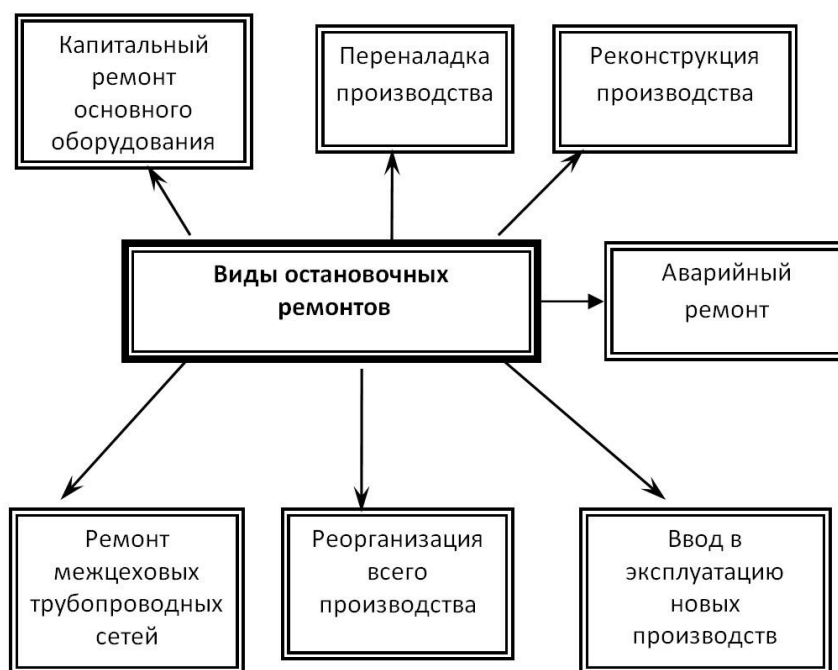


Рис. 1. Ремонты, выполнение которых связано с частичной или полной остановкой производства

2) переналадка производства, связанная с переходом на выпуск новой продукции. Этот вид остановочного ремонта, как правило, связан с добавлением в технологическую схему нового оборудования и настройкой его работы для поддержания технологических режимов выпуска новой продукции;

3) реконструкция производства – включает в себя разнообразный комплекс работ, от замены устаревшего оборудования и коммуникаций до сооружения новых производственных помещений. Конечной целью таких работ является увеличение или повышение качества выпускаемой продукции;

4) ремонт межцеховых трубопроводных сетей. Для обеспечения надежности работы системы транспортировки продуктов между различными цехами проводится ремонт трубопроводных сетей, который может включать замену старых труб и фильтров, а также ремонт участков, требующих особого внимания;

5) реорганизация всего производства. Необходимость изменения и модернизации производства может привести к ремонту нескольких цехов или всего предприятия. При этом происходит изменение организационной структуры, перенос оборудования и внедрение новых технологических процессов;

6) строительство и ввод в эксплуатацию новых производств. Развитие предприятия требует расширения производственных мощностей, поэтому проводится возведение новых производственных объектов, которое включает строительство новых цехов, монтаж и настройку нового оборудования, а также адаптацию производства к новым условиям;

7) аварийный ремонт. Система ППР [1] направлена на предотвращение аварийных ситуаций, однако практика показывает, что аварийные ситуации периодически возникают на производствах, что зачастую приводит к частичной или полной остановке производства и требует выполнения незамедлительных ремонтных работ по устранению неисправностей.

Планирование ремонтов

Каждый из приведенных видов ремонтных работ решает свои задачи, требует различной продолжительности выполнения и использования разных ресурсов. Однако все перечисленные выше типы ремонтов объединяет тот факт, что то или иное производство прекращает в течение определенного периода времени выпускать продукцию, что ведет к прямым потерям от ее недовыпуска. Поэтому уменьшение периодов простоя производств во время проведения остановочных ремонтов, а также эффективное использование этих периодов для восстановления ресурса работы оборудования является одной из актуальных задач на производстве.

Основная задача работы – создать гибкий и удобный инструмент для планирования остановочных ремонтов производственных объектов.

Под «планированием остановочных ремонтов» будем понимать построение полного календарного плана всех работ остановочного ремонта.

В целом планирование остановочных ремонтов для всех перечисленных выше типов состоит из трех основных этапов:

1) формирования производственного задания на ремонт в заданный период времени;

2) разработки плана ремонта;

3) разработки системы материально-технического снабжения ремонтов.

На *первом* этапе определяются цели и объем предстоящих ремонтных работ. При этом вначале составляется укрупненный список работ, который в дальнейшем при необходимости детализируется до отдельных операций. Рассмотрим данный механизм подробнее. Для правильного определения продолжительности остановочного ремонта, а также увязки планируемых работ с работами на других объектах необходимо в первую очередь определить, какие работы будут включены в план ремонта. Выделим три типа оборудования, которое может быть включено в общий план ремонта.

1. Тип «А» – оборудование, входящее в состав перечисленных выше остановочных ремонтов, то есть это перечень оборудования, составленный на основе анализа дефектных ведомостей по каждой единице оборудования, плана реконструкции; плана по строительству нового производства и т.д. Такой тип работ определяется в соответствии с условием

$$t_{\text{нач.ОР}} \leq t_i \leq t_{\text{нач.ОР}} + T_{\text{ОР}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{ОР}}$ – время проведения остановочного ремонта (в приведенных неравенствах при первоначальном расчете принимается равным директивному сроку проведения ремонта $T_{\text{дир}}$, ч, а затем, после решения основных задач планирования, определяется уточненное время проведения ремонта и задача формирования плана ремонтных работ решается вновь); t_i – запланированное время начала работ по ремонту или реконструкции оборудования i ; $t_{\text{нач.ОР}}$ – запланированное время начала остановочного ремонта.

2. Тип «В» – оборудование (кроме типа «А»), выход которого из строя может привести к остановке работы данного объекта химического предприятия. Время начала капитального или текущего ремонта такого оборудования находится в периоде времени в соответствии с условием

$$t_{\text{нач.ОР}} + T_{\text{ОР}} \leq t_{\text{КРi}} \leq t_{\text{нач.ОР}} + T_{\text{ОР}} + \Delta T_{\text{в}}, \quad (2)$$

где $\Delta T_{\text{в}}$ – некоторый диапазон времени после момента окончания ремонта (экспертная оценка). Например, это основное оборудование, капитальный или теку-

щий ремонт которого проводится раньше намеченного по ППР срока, ввиду его простоя по причине ремонта оборудования типа «А», при наличии свободного персонала.

3. Тип «С» – оборудование, время начала капитального (текущего) ремонта которого по системе ППР находится в чуть больших пределах проведения остановочного ремонта, то есть в соответствии с условиями:

$$t_{\text{нач.ОР}} - \Delta T_c \leq t_{\text{КР}_i} \leq t_{\text{нач.ОР}}; \quad (3)$$

$$t_{\text{нач.ОР}} + T_{\text{ОР}} \leq t_{\text{КР}_i} \leq t_{\text{нач.ОР}} + T_{\text{ОР}} + \Delta T_c, \quad (4)$$

где ΔT_c – время, на которое можно сместить начало проведения капитального (текущего) ремонта отдельного оборудования (берется из нормативов ТОР [1]),

Правило, по которому можно выделить оборудование «С», заключается том, что в системе технического обслуживания и ремонта предусмотрены временные допуски на смещение проведения капитального ремонта, что позволяет включить это оборудование в общий план остановочного ремонта.

Таким образом, в результате отбора оборудования по условиям (1) – (4) формируется общий список работ, связанных с его ремонтом. Кроме этого оборудования, в общий список включаются различные работы, не связанные с ремонтом оборудования, например доставка запасных частей, работы по строительству зданий и сооружений и т.д.

Полученный перечень работ представляется в виде сетевой модели, при построении которой определяется последовательность выполнения работ, возможные в них перерывы и взаимосвязь работ друг с другом. Построение сетевого графа возможно как вручную специалистами отдела главного механика, так и автоматически на основе отраслевых атласов типовых сетевых графов, составленных на основе метода стандартизации ремонтных работ по рациональным объемам [1].

Второй этап планирования остановочных ремонтов – решение задач календарного планирования работ ремонта.

Выделим недостатки используемых в настоящее время подходов при планировании подобных видов ремонта.

1. Задача определения плана ремонта в основном состоит из определения времени начала и продолжительности работ ремонта определенного объекта предприятия, без учета требуемого ресурса в рабочей силе на других объектах предприятия. В данной работе задача определения оптимального плана ремонтных работ тесно увязана с управлением ремонтным персоналом на предприятии в целом, то есть в результате решения задачи планирования получается календарный план работ ремонта и план оптимального распределения трудовых ресурсов отдельных категорий работников определенных специальностей централизованной ремонтной службы.

2. Нередко наблюдается неправильная оценка времени, необходимого для выполнения работ по ремонту определенного типа оборудования. Зачастую используют детерминированные оценки времени, взятые из нормативов, и не учитывают вероятностные оценки, что приводит к систематическим ошибкам в определении времени и стоимости выполнения ремонтов.

3. Характерно искусственное завышение времени выполнения работ. Например, продолжительность проведения капитального ремонта принимается из нормативов как фиксированная постоянная величина, не учитывая конкретные условия и требования данного производства.

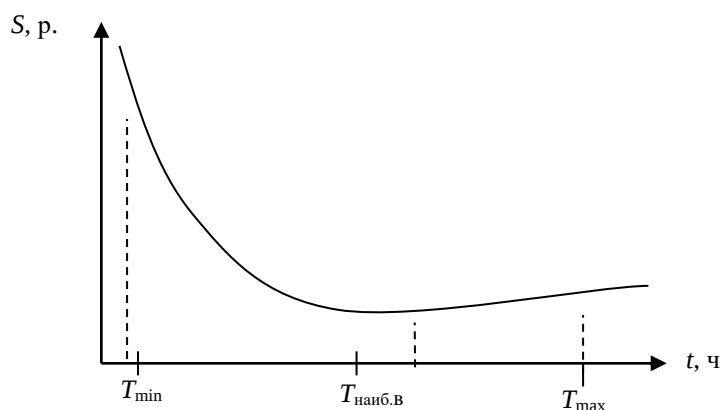


Рис. 2. Пример зависимости стоимости работы от времени

В работе продолжительность выполнения операции рассматривается как функциональная зависимость времени ее выполнения от стоимости (рис. 2). Характер зависимости определяется индивидуально для каждой единицы оборудования. При отсутствии таких зависимостей используются экспертные оценки сотрудников конкретного предприятия.

Таким образом, учет перечисленных выше аспектов является отличительной особенностью данной работы и позволяет разработать гибкую систему планирования ремонтов, способную решать множество разнообразных задач календарного планирования.

Постановка задачи планирования остановочных ремонтов

Неформализованную (словесную) постановку задачи календарного планирования работ остановочного ремонта можно сформулировать так [13]: разработать с учетом имеющихся трудовых и финансовых ресурсов план выполнения работ проекта, который при учете ряда ограничений минимизирует целевую функцию (затраты предприятия, время ремонта, потери от простоя и др).

Для формализации задачи введем обозначения: i – номер работы проекта которую надо выполнить $i = 1, N$; N – число работ проекта; τ_i^v – время выполнения i -й работы работником v -й специальности; $S_{\text{зарпл}}$ – заработная плата рабочих; $S_{\text{запч}}$ – затраты на покупку запчастей и оснастки; $S_{\text{матер}}$ – затраты на новые материалы; $S_{\text{уб.пр}}$ – потери от простоя объекта; N^v – ставка работника специальности v ; V^v – число сотрудников специальности v ; $T_{\text{рем}}$ – расчетное время выполнения ремонтных работ, ч; $X_{\text{нараб}}$ – количество выпускаемой продукции в единицу времени, т/ч; $S_{\text{ед. пр}}$ – стоимость продукции, р./т;

Ограничения:

$$- \sum_{i=1}^n V_i^v \leq V^v \text{ – число работников каждой специальности ограничено;}$$

$- t_j - t_i \geq t_{ij}$ – наличие перерывов при выполнении работ (для тех работ, где это допускается);

- $T_{\text{рем}} \leq T_{\text{дир}}$ – ограничение срока выполнения работ ремонта;
- $\sum \Delta \tau_{ij}^v \leq \tau$ – ограничение на работу специалистов одной специальности v ;
- $\sum S_{\Delta}^{\text{KP } i} \leq S_{\Delta \text{ норм}}$ – ограничение на финансы.

Тогда целевую функцию можно записать как

$$F_{\text{шт}} = S_{\text{зарпл}} + S_{\text{запч}} + S_{\text{матер}} + S_{\text{убыт.пр}} \rightarrow \min, \quad (10)$$

где

$$S_{\text{зарпл}} = \sum_{i=1, v=1}^n (\tau_i^v N^v) + S_{\text{кач}} + S_{\text{напр.}}; \quad (11)$$

$$S_{\text{напр}} = S(\tau_i^v) \quad (12)$$

– величина оплаты от напряженности работы. Чаще всего эту функцию применяют в следующем виде:

$$S_{\text{напр}} = \sum_{i=1, v=1}^{N, V} \frac{A}{e^{B\tau_i^v}}, \quad (13)$$

где $A, B = \text{const}$;

$$S_{\text{запч}} = S_{\text{изгот}} + S_{\text{приобрет}} + S_{\text{дост}}; \quad (14)$$

$$S_{\text{матер}} = S_{\text{изгот}} + S_{\text{приобрет}} + S_{\text{дост}}; \quad (15)$$

$$S_{\text{уб.пр}} = T_{\text{рем}}(\tau_i^v) X_{\text{нараб}} S_{\text{ед. пр}}. \quad (16)$$

В результате получаем общую формулу

$$F_{\text{шт}} = \min \left(\sum_{i=1, v=1}^n (\tau_i^v N^v) + S_{\text{кач}} + S(\tau_i^v) + S_{\text{изгот}} + S_{\text{приобр}} + S_{\text{дос}} + T_{\text{рем}}(\tau_i^v) X_{\text{нараб}} S_{\text{ед. пр}} \right). \quad (17)$$

С учетом введенных обозначений задача планирования остановочных ремонтов сводится к определению вектора параметров $\{\tau_i^v, T_{\text{рем}}(\tau_i^v), S(\tau_i^v), K\}$, которые минимизируют целевую функцию (17) при выполнении наложенных ограничений (5) – (9).

Прямое решение этой задачи затруднено из-за наличия большого числа варьируемых параметров [14], поэтому для ее решения предлагается итерационный подход, при котором решение основной задачи заменяется решением ряда более простых, имеющих самостоятельное значение.

Алгоритм решения задачи планирования остановочных ремонтов

Процесс решения задачи планирования остановочных ремонтов можно представить в виде следующие шаги:

1. Формирование перечня ремонтных работ. На этом шаге происходит отбор оборудования в соответствии с заданными условиями, составление перечня работ на основе анализа дефектных ведомостей и добавление дополнительных операций.

2. Построение сетевого графа остановочного ремонта. В данном шаге создается общая сетевая модель ремонта, которая основывается на типовых сетевых графах оборудования и соответствующих им дефектных ведомостях. Это делается при условии наличия работ по восстановлению данного оборудования в перечне ремонтных работ, определенном в предыдущем шаге.

3. Определение видов функциональных зависимостей. На этом этапе выбирается конкретный график зависимости времени выполнения от стоимости работы. Различные виды функциональных зависимостей могут быть применены от конкретной ситуации.

4. Определение времени проведения остановочного ремонта. Решается задача календарного планирования, включающая составление календарного плана ремонтных работ по различным критериям (минимальный срок проведения ремонта, учет ограничений на трудовые ресурсы, ограниченное финансирование и заданный срок проведения ремонта). Также учитывается вероятностная оценка длительности работ.

5. Оптимальное распределение ремонтного персонала. На этом этапе происходит перераспределение рабочих по объектам, чтобы обеспечить их равномерную загрузку.

Каждый шаг вносит свой вклад в решение общей задачи планирования остановочных ремонтов. Итерационная схема решения этой задачи представлена на рис. 3.

Наиболее трудоемким из перечисленных выше блоков является блок 4 – решение задач календарного планирования. Рассмотрим основные подзадачи, решаемые в данном блоке.

1. Постановка подзадачи определения длительности остановочного ремонта без ограничений на трудовые ресурсы.

Дано: $V = \{V_i | i = \overline{1, N}\}$ – множество событий остановочного ремонта;
 $U = \{U_{i,j} | i = \overline{1, N}, j = \overline{1, N}\}$ – множество работ ремонта между его событиями i, j ;
 $U_{i,j} = t_{i,j}$ – длительность работы.

Обозначим: K – число всех возможных путей выполнения ремонта, соединяющих события 1 и N ; n_l – число событий остановочного ремонта, лежащих на l -м пути их возможного выполнения $l = \overline{1, K}$; V_m^l – номер m -го события ремонта в l -м пути $m = \overline{1, n_l}$; $V^l = \{V_m^l | m = \overline{1, n_l}\}$ – множество событий ремонта в l -м пути $V^l \subset V$.

Требуется найти такую последовательность работ остановочного ремонта на пути l с событиями $V^l \subset V$, что

$$\sum_{m=1}^{n_l-1} U_{V_m^l, V_{m+1}^l} = \max_l \quad (18)$$

при ограничениях:

$$V_1^l = V_1 \wedge V_N^l = V_N \forall l = \overline{1, K}; \quad (19)$$

$$V_m^l, V_{m+1}^l \in V^l \subset V \forall l = \overline{1, K}; m = \overline{1, n_l-1}, T_b \leq t_{ij} \leq T_n. \quad (20)$$

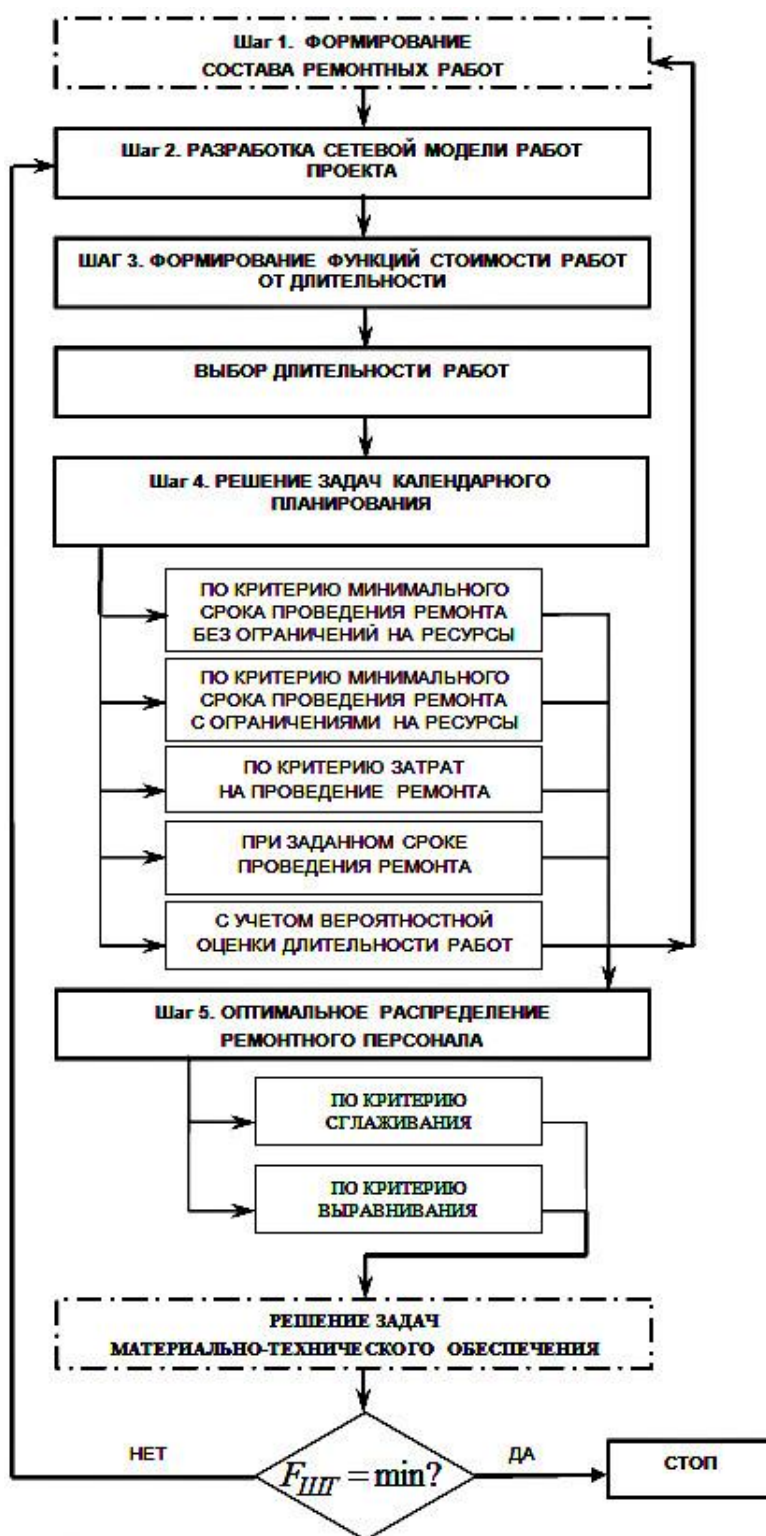


Рис. 3. Схема решения задачи планирования остановочных ремонтов

2. Постановка подзадачи определения длительности остановочного ремонта с ограничением на трудовые ресурсы.

Обозначим: A – ресурс, доступный в каждый день выполнения проекта; τ_k – длина k -го промежутка Δk , (ширина ступеньки на ресурсном профиле), причем

$$\sum_{k=1}^q \tau_k = T, \text{ где } T - \text{ время выполнения проекта.}$$

Суммарный ежедневный ресурс, необходимый для выполнения работ фронта F_k , обозначим, как $r_k = \sum_{ij \in F_k} r_{ij}$, где r_{ij} – ресурс, необходимый i, j работе. Если

окажется, что $r_k > A$, то для такого фронта работ полагают $\tau_k = 0$.

Тогда задачу можно сформулировать следующим образом: необходимо найти

$$\min T = \sum_{k=1}^m \tau_k, \quad (21)$$

при ограничениях

$$\sum_{ij \in F_k} \tau_k = t_{ij}, \tau_k \geq 0 \quad (k = 1, 2, \dots, m), \quad (22)$$

сетевых ограничениях

$$\tau_k = 0 \quad \forall \quad r_k > A, \quad T_j - T_i \geq t_{ij}. \quad (23)$$

3. Постановка подзадачи определения плана работ при ограниченном финансировании [14].

Предполагается, что для каждой i, j работы задана функция «время – стоимость»

$$c_{ij} = \varphi_{ij}(t_{ij}),$$

где c_{ij} – стоимость (прямые затраты); t_{ij} – продолжительность.

Длительность выполнения каждой работы ограничена

$$0 \leq d_{ij} \leq t_{ij} \leq D_{ij}. \quad (24)$$

Задан директивный срок $T_{\text{дир}}$ выполнения проекта

$$T_{\text{кр}} \leq T_{\text{дир}}. \quad (25)$$

Требуется определить такие продолжительности t_{ij} работ (i, j) , при которых суммарные затраты

$$c_{\text{сум}} = \sum_{(ij) \in U} c_{ij} = \sum_{(ij) \in U} \varphi_{ij}(t_{ij}) \quad (26)$$

были бы минимальными при выполнении ограничений (24) и (25). Сетевые ограничения также должны быть выполнены

$$T_j - T_i \geq t_{ij}; \quad T_{i0} = T_0. \quad (27)$$

После построения и оптимизации календарного плана остановочного ремонта решается задача оптимального использования работников централизованной ремонтной службы завода при планировании работ различных видов ремонта оборудования.

Третий этап планирования остановочных ремонтов – разработка подсистемы материально-технического снабжения ремонтов (МТСР).

На основе проведенного анализа различных работ по материально-техническому снабжению ремонтов сделан следующий вывод. Одна из наиболее острых проблем при выполнении ремонтов заключается в необходимости приостановок выполнения ремонта, вызванных запаздыванием доставки запасных частей, материалов или оборудования. Проблемы возникают и тогда, когда материалы прибывают слишком рано или когда заказанные запчасти отсутствуют на складе. Поэтому, оптимальное календарное планирование остановочных ремонтов невозможно без использования подсистемы материально-технического снабжения ремонтов, которая позволит избежать эти и многие другие сложности при реализации плана. Это достигается следующим образом. На этапе календарного планирования остановочного ремонта при расчете времени проведения работ формируются заказные спецификации на запчасти, оснастку, материалы и пр., которые передаются подсистеме МТСР, где обрабатываются и при необходимости вносят коррективы в календарный план ремонта путем добавления в него «фиктивных» работ.

Подсистема материально-технического снабжения позволяет:

1. Определять наличие запасных частей и материалов к тому моменту, когда они будут требоваться по плану, что важно для определения физической реализуемости плана ремонта.
2. Регулярно предоставлять текущую информацию о состоянии запасов и этапах изготовления запчастей заинтересованным подразделениям предприятия.
3. Исключать простои в работе, возникающие из-за отсутствия требуемых запчастей и материалов в нужное время.
4. Учитывать избыточные запасы и по возможности минимизировать их уровни на складах.

Результаты работы

Рассмотренные выше три этапа планирования остановочных ремонтов представляют собой суть системы календарного планирования остановочных ремонтов, которая позволит проводить такие типы ремонтов с минимальными затратами и оптимальной занятостью ремонтного персонала [15].

Система была апробирована при решении задачи реконструкции сахарного производства, при которой проводилась модернизация продуктового отделения при переработке экстракта [16]. Цель реконструкции – обеспечить переработку экстракта с плановой производительностью 900 т/сут. Решение задач календарного планирования показало, что минимальное время выполнения работ проекта составляет 36 дней. При расчете учитывался сезонный характер работы сахарного производства, что определило время начала ремонта в сезон наименьшей загрузки производства.

Заключение

Надлежащее проведение остановочных ремонтов производства является фундаментальной задачей для обеспечения надежности, эффективности и долговечности производственных установок. Все виды ремонтов, будь то запланированный профилактический, капитальный или аварийный, необходимы для обеспечения бесперебойной работы и увеличения производительности предприятия. Правильное и своевременное проведение остановочных ремонтов – залог успешного и стабильного функционирования производства и достижения поставленных целей.

Кроме того, проведение остановочных ремонтов сложных производственных объектов предоставляет возможность для модернизации и внедрения новых тех-

нологий. В процессе ремонта могут быть предприняты шаги по повышению эффективности производства, снижению энергопотребления и улучшению качества продукции. Это важный момент, который позволяет предприятию быть конкурентоспособным на рынке и адаптироваться к постоянно меняющимся требованиям потребителей и технологий.

Список литературы

1. Система технического обслуживания и ремонта оборудования предприятий химической промышленности / В. Н. Азаров, В. С. Востриков, В. С. Ломакин [и др.], – М. : Химия, 1986. – 352 с.
2. Андреев, А. В. Методы ремонта оборудования химических производств / А. В. Андреев // Химическая промышленность. – 2019. – № 4. – С. 23 – 27.
3. Волков, Д. С. Тенденции развития методов ремонта оборудования химических производств / Д. С. Волков. // Вестник химической технологии. – 2019. – Т. 4, № 2. – С. 67 – 73.
4. Барсуков, А. Т. Методы планирования ремонта промышленного оборудования / А. Т. Барсуков // Вестник Томского политехнического университета. – 2018. – Т. 314, № 7. – С. 70 – 79.
5. Амбарцумян, А. А. Анализ функциональности систем управления техническим обслуживанием и ремонтом оборудования / А. А. Амбарцумян, А. С. Хадеев // Проблемы управления. – 2005. – № 6. – С. 2 – 12.
6. Петров, В. Г. Применение инновационных методов ремонта в химических производствах / В. Г. Петров // Химическая промышленность. – 2020. – № 4. – С. 67 – 74.
7. Тарасов, М. В. Инновационные методы ремонта оборудования химических производств / М. В. Тарасов // Химическая промышленность. – 2019. – № 3. – С. 45 – 51.
8. Уваров, В. А. Разработка и внедрение новых методов ремонта оборудования на химических предприятиях / В. А. Уваров // Химическая технология и инжиниринг. – 2020. – Т. 2. – № 4. – С. 112 – 120.
9. Мизюн, В. А. Интегрированные системы визуального управления производством, диагностики и планирования ремонта технологического оборудования в химической промышленности: эффект синергии / В. А. Мизюн, С. А. Похлебкин // Организатор производства. – 2012. – № 1(52). – С. 37 – 41.
10. Смирнов, Д. А. Проблемы и перспективы планирования ремонта промышленного оборудования / Д. А. Смирнов, А. Е. Шульга // Вестник национального исследовательского Томского политехнического университета. – 2013. – № 1. – С. 63 – 70.
11. Яковлева, М. В. Разработка рекомендаций по внедрению предиктивного обслуживания оборудования на высокотехнологичных предприятиях / М. В. Яковлева, А. И. Шалина // Вопросы инновационной экономики. – 2023. – Т. 13, № 3. – С. 1531 – 1550. doi: 10.18334/vinec.13.3.118259
12. Мынцов, А. А. Системы автоматического вибродиагностирования - шаг к внедрению предиктивного обслуживания / А. А. Мынцов, О. В. Мынцова, Д. В. Соколов // Цемент и его применение. – 2020. – № 4. – С. 50 – 53.
13. Егоров, С. Я. Разработка системы планирования остановочных ремонтов многоассортиментных химических производств / С. Я. Егоров, А. С. Карташов // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2006. – № 12. – С. 24 – 31.
14. Золотов, Д. А. Постановка задачи планирования остановочных ремонтов промышленных производств / Д. А. Золотов, П. В. Сеницын, С. Я. Егоров // Молодежная наука в развитии регионов. – 2019. – Т. 1. – С. 108 – 111.

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

16. Бетин, В. В. Модернизация работы продуктового отделения при переработке экстракта / В. В. Бетин, С. Я. Егоров // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : материалы IX Междунар. науч.-практич. конф. (Тамбов, 24–25 октября 2023 г.). Т. 9. – Тамбов, 2023. – С. 238 – 241.

Planning of Shutdown Repairs at Chemical Industry Enterprises

S. Ya. Egorov¹✉, V. A. Nemtinov¹, I. A. Avtsinov²

*Department of Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering (1),
egorovsky@yandex.ru, TSTU, Tambov, Russia;*

*Department of Automated Process and Production Control Systems (2),
Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russia*

Keywords: scheduling; shutdown repair; task setting; maintenance system; network model.

Abstract: The peculiarities of chemical industry enterprises influencing the organization and carrying out of repair of technological equipment are considered. Special attention is paid to the repairs, the fulfillment of which relates to partial or full stoppage of production, and to the planning of shutdown repairs. Seven types of repairs corresponding to the term “shutdown repair” are singled out. Three main stages of planning are presented: the formation of the production task for repair; the development of the repair network model and the development of the repair logistics system. The description of the problem statement of calendar planning of shutdown repairs and its solution is given. Due to the complexity of the direct solution of the problem, an iterative approach is proposed, in which the solution of the main problem is replaced by solving a number of simpler problems of independent importance. The obtained results are realized in the development of the system of scheduling of shutdown repairs. The application of the system is possible for any types of productions related to stop repairs, which is confirmed by the calculation example.

References

1. Azarov V.N., Vostrikov V.S., Lomakin V.S. [et al.]. *Sistema tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta oborudovaniya predpriyatij himicheskoy promyshlennosti* [System of technical maintenance and repair of equipment of chemical industry enterprises], Moscow: Himiya, 1986, 352 p. (In Russ.)

2. Andreev A.V. [Methods of repair of chemical production equipment], *Himicheskaya promyshlennost'* [Chemical industry], 2019, no. 4, pp. 23-27. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Volkov D.S. [Trends in the development of methods for repairing chemical production equipment], *Vestnik himicheskoy tekhnologii* [Bulletin of Chemical Technology], 2019, vol. 4, no. 2, pp. 67-73. (In Russ., abstract in Eng.)

4. Barsukov A.T. [Methods of planning repair of industrial equipment / A. T. Barsukov], *Vestnik Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Tomsk Polytechnic University], 2018, vol. 314, no. 7, pp. 70-79. (In Russ., abstract in Eng.)

5. Ambarcumyan A.A., Hadeev A.S. [Analysis of the functionality of equipment maintenance and repair management systems], *Problemy upravleniya* [Problems of Management], 2005. no. 6, pp. 2-12. (In Russ., abstract in Eng.)

6. Petrov V.G. [Application of innovative repair methods in chemical production], *Himicheskaya promyshlennost'* [Chemical industry], 2020, no. 4, pp. 67-74. (In Russ., abstract in Eng.)
7. Tarasov M.V. [Innovative methods of repair of chemical production equipment], *Himicheskaya promyshlennost'* [Chemical industry], 2019, no. 3, pp. 45-51. (In Russ., abstract in Eng.)
8. Uvarov V.A. [Development and implementation of new methods of equipment repair at chemical plants], *Himicheskaya tekhnologiya i inzhiniring* [Chemical technology and engineering], 2020, vol. 2, no. 4, pp. 112-120. (In Russ., abstract in Eng.)
9. Mizyun V.A., Pohlebkina S.A. [Integrated systems of visual production management, diagnostics and repair planning of process equipment in the chemical industry: synergy effect], *Organizator proizvodstva* [Production organizer], 2012, no. 1(52), pp. 37-41. (In Russ., abstract in Eng.)
10. Smirnov D.A., Shul'ga A.E. [Problems and prospects of industrial equipment repair planning], *Vestnik nacional'nogo issledovatel'skogo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the National Research Tomsk Polytechnic University], 2013, no. 1, pp. 63-70. (In Russ., abstract in Eng.)
11. Yakovleva M.V., Shalina A.I. [Development of recommendations for the implementation of predictive equipment maintenance at high-tech enterprises], *Voprosy innovacionnoj ekonomiki* [Issues of innovative economics], 2023, vol. 13, no. 3, pp. 1531-1550. doi: 10.18334/vinec.13.3.118259. (In Russ., abstract in Eng.)
12. Myncov A.A., Myncova O.V., Sokolov D.V. [Automatic vibration diagnostics systems - a step towards the implementation of predictive maintenance], *Cement i ego primenenie* [Cement and its application], 2020, no. 4, pp. 50-53. (In Russ., abstract in Eng.)
13. Egopov S.Ya., Kaptashov A.S. [Development of a system for planning shutdown repairs of multi-assortment chemical plants], *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya* [Repair. Restoration. Modernization], 2006, no. 12, pp. 24-31. (In Russ., abstract in Eng.)
14. Zolotov D.A., Sinitsyn P.V., Egorov S.Ya. [Formulation of the problem of planning stop repairs of industrial production], *Molodezhnaya nauka v razviti regionov* [Youth science in the development of regions], 2019, vol. 1, pp. 108-111. (In Russ., abstract in Eng.)
15. Krasnyanskiy M.N., Mokrozub V.G., Nemtinov V.A. [et al.]. *Cifrovoe mashinostroenie* [Digital engineering], Tambov: TSTU Publ., 2023, 266 p. (In Russ.)
16. Betin V.V., Egorov S.Ya. *Virtual'noe modelirovanie, prototipirovanie i promyshlennyj dizajn: Materialy IX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Virtual modeling, prototyping and industrial design: Proceedings of the IX International scientific and practical conf.] (Tambov, 24-25 October 2023), vol. 9, Tambov, 2023, pp. 238-241. (In Russ.)
-

Planung von Abschaltungsreparaturen bei Unternehmen der chemischen Industrie

Zusammenfassung: Betrachtet sind die Merkmale von Unternehmen der chemischen Industrie, die Einfluss auf die Organisation und Reparatur technologischer Geräte haben. Besonderes Augenmerk ist auf Reparaturen gelegt, deren Durchführung mit einem teilweisen oder vollständigen Stillstand der Produktion verbunden ist, sowie auf die Planung von Stillstandsreparaturen. Es sind sieben Arten von Reparaturen identifiziert, die dem Begriff „Stopp-Reparatur“ entsprechen. Es sind drei Hauptphasen der Planung vorgestellt: die Bildung der Produktionsaufgabe für Reparaturen;

Entwicklung des Reparaturnetzwerkmodells und Entwicklung des Reparaturlogistiksystems. Es ist die Beschreibung der Formulierung des Problems der Planung von Stillstandsreparaturen und seiner Lösung gegeben. Aufgrund der Komplexität der direkten Lösung des Problems ist ein iterativer Ansatz vorgeschlagen, bei dem die Lösung des Hauptproblems durch die Lösung mehrerer einfacherer Probleme mit unabhängiger Bedeutung ersetzt wird. Die gewonnenen Ergebnisse sind in die Entwicklung eines Systems zur Planung von Stillstandsreparaturen umgesetzt. Das System kann für jede Art von Produktion im Zusammenhang mit Stillstandsreparaturen eingesetzt werden, was durch ein Berechnungsbeispiel bestätigt wird.

Planification des réparations d'arrêt dans les installations de l'industrie chimique

Résumé: Sont examinées les caractéristiques des entreprises de l'industrie chimique qui influent sur l'organisation et la réparation des équipements technologiques. Une attention particulière est accordée aux réparations impliquant un arrêt partiel ou complet de la production, ainsi qu'à la planification des réparations d'arrêt. Sont présentés sept types de réparations correspondant à l'expression «réparations d'arrêt». Sont présentés trois grandes étapes de la planification: la formation d'une tâche de production pour les réparations; l'élaboration d'un modèle de réseau pour les réparations et l'élaboration d'un système logistique pour les réparations. Est donnée une description du problème de la planification et de la résolution des réparations d'arrêt. En raison de la complexité de la résolution directe du problème, est proposée une approche itérative, dans laquelle la résolution du problème principal est remplacée par la résolution d'un certain nombre de problèmes plus simples qui ont une signification indépendante. Les résultats obtenus sont mis en œuvre lors du développement du système de planification des réparations d'arrêt. L'utilisation du système est possible pour tout type de production impliquant des réparations d'arrêt, comme le montre l'exemple de calcul.

Авторы: *Егоров Сергей Яковлевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; *Немтинов Владимир Алексеевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия; *Авцинов Игорь Алексеевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизированных систем управления процессами и производствами, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», Воронеж, Россия.

**ОПЕРАТИВНАЯ КОРРЕКЦИЯ ВЕСА АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ
В БАЙЕСОВСКОМ АЛГОРИТМЕ РАСПОЗНАВАНИЯ
СОСТОЯНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ
И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ**

В. И. Павлов^{1✉}, Т. Ю. Дорохова¹, С. В. Артемова², С. В. Толстых¹

*Кафедра «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» (1),
vpavl@mail.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия;
кафедра КБ-1 «Защита информации» (2),
ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», Москва, Россия*

Ключевые слова: априорная информация; информационно-измерительная и управляющая система; оперативная коррекция.

Аннотация: Предложен новый метод оперативной коррекции веса априорной информации в байесовском алгоритме распознавания состояния информационно-измерительной и управляющей системы, повышающий ее помехоустойчивость. В методе применяются так называемые индикаторы сопутствующих признаков сигналов и помех. Указан признак несоответствия действительности априорной информации в текущей сессии функционирования информационной системы. Предложенный метод является универсальным и применим, в том числе к информационным системам с открытыми входными каналами.

Обозначения

$\mathbf{x}$ – вектор фазовых координат объекта;	s – номер сигнально-помеховой ситуации/структуры ИИУС;
$\mathbf{z}$ – вектор сигналов измерений;	N – множество сопутствующих признаков P_r воздействия помех на ИИУС;
$\mathbf{r}$ – вектор индикации сопутствующих признаков сигналов и помех;	$\boldsymbol{\pi}$ – матрица условных вероятностей переходов индикаторов помех;
$\mathbf{u}$ – вектор управлений объектом;	d – оптимизируемый коэффициент;
$\boldsymbol{\xi}$ – вектор шумов состояния объекта;	Δt – промежуток времени от момента изменения состояния любого из индикаторов сопутствующих признаков помех до момента изменения номера ситуации s ;
$\boldsymbol{\zeta}$ – вектор шумов измерений;	$\hat{P}_k^{(s)}$ – вероятность сложившейся сигнально-помеховой ситуации;
J – индикаторная функция входного сигнала;	$\wedge$ – знак оценки;
P_r – признак сигнала (помехи);	$\sim$ – знак априорного значения.
k – шаг счета;	
n – номер признака помехи;	
r – выходной сигнал индикатора помехи;	
σ – СКО выходного сигнала измерителя;	
I – количество измеряемых фазовых координат;	

Введение

Информационно-измерительные и управляющие системы (ИИУС), получившие широкое распространение при управлении технологическими процессами, на транспорте, в системах радиолокации, связи, как правило, подвержены действию естественных и преднамеренных помех в спектральном диапазоне их датчиков информации. Из-за действия помех, особенно преднамеренных, измерения фазовых координат процессов (объектов), выполняемые ИИУС, как правило,

осуществляются с ошибками [1]. Одним из приемов обеспечения помехоустойчивости ИИУС является адаптация их структуры к изменениям сигнально-помеховой обстановки, которую целесообразно выполнять методами теории систем со случайной сменой структуры в пространстве состояний [2, 3]. В соответствии с данной теорией необходимо предварительно классифицировать возможную при функционировании ИИУС сигнально-помеховую обстановку и в последующем выполнять распознавание складывающейся в текущий момент времени сигнально-помеховой ситуации.

В работе [4] разработан байесовский алгоритм распознавания сигнально-помеховых ситуаций, возникающих в результате воздействия помех на информационно-измерительную систему, в котором помимо измерителей фазовых координат объекта и априорной информации об интенсивностях смены сигнально-помеховых ситуаций используются так называемые индикаторы сопутствующих признаков (ИСП) сигналов и помех [5, 6]. Исследования алгоритма показали, что одной из причин снижения достоверности распознавания, а также увеличения задержек в принятии решения о сложившейся сигнально-помеховой ситуации является существенное несоответствие между априорной и апостериорной информацией. В данном алгоритме при задержках принятия решений предусмотрена возможность оперативной коррекции априорной информации, в том числе за счет использования ИСП помех. Достоинством алгоритма является повышение достоверности и сокращение задержки в принятии решений, недостатком – снижение веса всего массива априорной информации при принятии последующего решения.

В настоящей статье предлагается новый метод коррекции веса априорной информации в байесовском алгоритме распознавания сигнально-помеховых ситуаций. Метод рассматривается на примере бортовой радиолокационной станции подвижного объекта в силу открытости и, соответственно, подверженности помехам ее информационных каналов. Выбор примера обусловлен как высоким уровнем развития науки и техники в данной предметной области, так и разнообразием условий функционирования технических средств, в том числе из-за воздействия естественных и преднамеренных помех. Обеспечение требуемой эффективности функционирования ИИУС во многих других предметных областях может быть реализовано по аналогии или в результате упрощения.

Постановка задачи

В качестве подвижного объекта рассматривается летательный аппарат, располагающий ИИУС на базе бортовой радиолокационной станции. Векторы фазовых координат летательного аппарата $\mathbf{x}$, сигналов измерений $\mathbf{z}$ и индикации сопутствующих признаков сигналов и помех $\mathbf{r}$ имеют вид моделей:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{f}^{(s)}(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, \xi_k); \quad (1)$$

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{h}^{(s)}(\mathbf{x}_k, \zeta_k); \quad (2)$$

$$\mathbf{r}_k = \boldsymbol{\pi}(J_k, \text{Pr}_k), \quad (3)$$

где $\mathbf{f}$, $\mathbf{h}$ – известные вектор-функции векторных аргументов; $\boldsymbol{\pi}(J_k, \text{Pr}_k)$ – матрица условных вероятностей переходов индикаторов из r_{k-1} в r_k состояние с элементами $\pi_n(J_k, \text{Pr}_k) = \pi_n(r_k, k | J_{n,k-1}, \text{Pr}, r_{k-1}, k-1)$, $J_{n,k} = q_n(\text{Pr}, k | s_k^T, k)$ – входная индикаторная функция, характеризующая наличие признака преднамеренной помехи, $n = 1, N$; Pr – регистрируемый признак, $\text{Pr} = 0, 1$; $s_k^T = [s_{1,k}, \dots, s_{N,k}]$ – вектор множества скалярных индексов возможных помеховых ситуаций и соот-

ветствующих им структур ИИУС; $s = \overline{1, S}$; S – число структур; $x_k^T = [x_{1,k}, \dots, x_{i,k}]$ – вектор множества скалярных значений i -й фазовой координаты подвижного объекта, $i = \overline{1, I}$.

По итогам анализа возможной помеховой обстановки определены: перечень преднамеренных помех; возможные сигнально-помеховые ситуации, составляющие полную группу несовместных событий; априорные интенсивности смены $\tilde{\gamma}^{(sl)}$ из s -й в l -ю и $\tilde{\gamma}^{(ls)}$ – из l -й в s -ю сигнально-помеховых ситуаций; множество N сопутствующих признаков R_{Γ} воздействия помех на ИИУС. Вариант классификации сигнально-помеховых ситуаций при функционировании ИИУС показан в виде табл. 1, ожидаемые выходные сигналы измерителей и ИСП в соответствующих ситуациях – в табл. 2, в которых обозначены: ШШ, УШ, СШ – соответственно широкополосная, узкополосная, скользящая шумовые помехи; ХИ – хаотическая импульсная помеха; УД, УС, УН – соответственно уводящие по дальности, скорости, направлению помехи; $\alpha\beta$, D , V – соответственно измерители угла, дальности и скорости сближения с лоцируемым объектом; ИМ, СИ, ЧФ – соответственно индикатор мощности, счетчик импульсов, частотный фильтр, выступающие в роли индикаторов сопутствующих признаков помех. На рисунке 1 показан фрагмент графа возможных взаимных переходов между ситуациями, на рис. 2 – возможная реализация их смены.

Таблица 1

Классификация сигнально-помеховых ситуаций

s	Маскирующие помехи					Имитирующие помехи			
	ШШ	УШ	СШ	ХИ	...	УД	УС	УН	...
1	–	–	–	–		–	–	–	
2	+	–	–	–		+	+	–	
...									
s	–	–	–			+	–	–	
...									
l	–	–	+	+		–	–	+	
...									
S	–	+	–	–		–	+	–	

Таблица 2

Выходные сигналы информационных устройств

s	Измерители				Индикаторы			
	$\alpha\beta$	D	V	...	ИМ	СИ	ЧФ	...
1	$\alpha\beta$	D	V		0	0	0	
2	$\alpha\beta$	σ_D	σ_V		1	0	0	
...								
s	$\alpha\beta$	D_{Π}	V_{Π}		1	1	0	
...								
l	$\alpha\beta$	σ_D	σ_V		1	1	1	
...								
S	$\alpha\beta$	σ_D	σ_V		1	0	1	

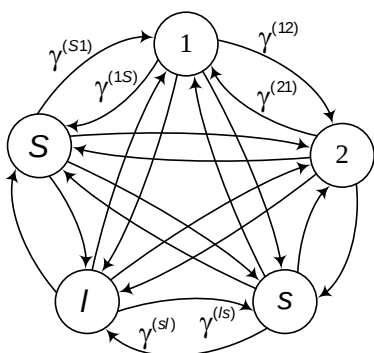


Рис. 1. Граф переходов сигнально-помеховых ситуаций

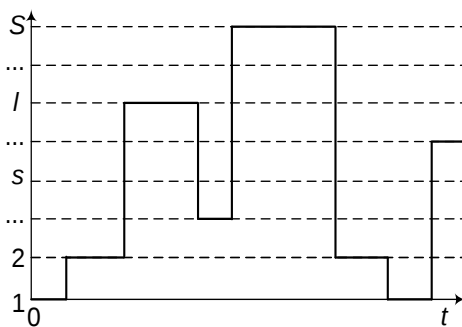


Рис. 2. Вариант реализации смены сигнально-помеховых ситуаций

Алгоритм распознавания сигнально-помеховых ситуаций

Алгоритм распознавания сигнально-помеховых ситуаций, в котором предусматривается возможность коррекции веса априорной информации, имеет вид [4]:

$$\hat{P}_k^{(s)} = \left[\frac{\tilde{P}^{(s)} \pi(J, Pr) \exp[-0,5g^{(s)}(z)]}{\sum_{s=1}^S \tilde{P}^{(s)} \pi(J, Pr) \exp[-0,5g^{(s)}(z)]} \right]_k; \quad (4)$$

$$\tilde{P}_k^{(s)} = \left[\hat{P}^{(s)} - D \Delta t \left(\hat{P}^{(s)} \sum_{s=1 \neq l}^S \tilde{\gamma}^{(sl)} - \sum_{l=1 \neq s}^S \tilde{\gamma}^{(ls)} \hat{P}^{(l)} \right) \right]_{k-1}; \quad D = \frac{1}{d\Delta\tau + 1}; \quad (5)$$

$$g^{(s)}(z) = \sum_{i=1}^I g^{(s)(i)}(z^{(i)}), \quad s = \overline{1, S}, \quad i = \overline{1, I}; \quad (6)$$

$$g^{(s)(i)}(z^{(i)}) = \left[\frac{z^{(i)} - \hat{x}^{(s)(i)}}{\sigma^{(i)}} \right]^2; \quad (7)$$

$$\hat{s} = \arg \max_s (\hat{P}_k^{(s)}), \quad (8)$$

где $z^{(i)}$, $\sigma^{(i)}$ – соответственно выходной сигнал i -го измерителя и его СКО; $\hat{x}^{(s)(i)}$ – среднее значение i -й фазовой координаты в s -й сигнально-помеховой ситуации; $\tilde{\gamma}^{(ls)}$, $\tilde{\gamma}^{(sl)}$ – априорные интенсивности смены сигнально-помеховых ситуаций из s -й в l -ю и наоборот из l -й в s -ю соответственно; $\Delta\tau$ – промежуток времени от момента изменения состояния любого из ИСП помех до момента изменения номера ситуации s в соответствии с критерием (8); Δt – длительность шага счета, $\Delta t = t_k - t_{k-1}$.

Требуется на основании (1) – (8) определить степень влияния соответствия априорных $\tilde{\gamma}^{(ls)}$, $\tilde{\gamma}^{(sl)}$ и фактических $\gamma^{(ls)}$, $\gamma^{(sl)}$ интенсивностей смены сигнально-помеховых ситуаций на эффективность принятия решения о сложившейся сигнально-помеховой ситуации и предложить рациональный вариант коррекции веса априорной информации в случаях ее несоответствия фактической.

Сущность предлагаемого варианта оперативной коррекции априорной информации

Эффективность применения байесовских алгоритмов в ИИУС существенно зависит от соответствия реальности априорной информации в текущий момент времени. Проблема заключается в том, что для значимого изменения априорной информации требуется статистика, то есть неизбежные временные затраты, что для критически важных ИИУС неприемлемо. Снижение веса всего массива априорной информации в существующем алгоритме в соответствии с выражением (5) весьма положительно сказывается на достоверности и скорости принятия решений в краткосрочной перспективе, однако при последующих решениях в случае большой интенсивности шумов измерителей из-за воздействия помех (большие значения $\sigma^{(i)}$ в выражении (7)) значимость априорной информации понижается. Сущность предлагаемого варианта оперативной коррекции априорной информации заключается в трансформации выражения (5) для априорной вероятности s -й сигнально-помеховой ситуации, включая коэффициент D и область его применения.

При изменении состояния (выходного сигнала) любого из ИСП алгоритм (1) – (8) с некоторой задержкой принимает решение (8) об изменении текущей сигнально-помеховой ситуации и, соответственно, структуры ИИУС, при этом величина задержки характеризует степень несоответствия априорной и фактической интенсивностей переходов в ту ситуацию (ситуации и, соответственно, структуры ИИУС), о которой сигнализирует ИСП. Соответствие выходных сигналов ИСП номерам сигнально-помеховых ситуаций фиксируется при предварительной классификации возможных сигнально-помеховых ситуаций в виде табл. 1 и 2. Возможные варианты оперативной коррекции веса априорной информации следующие: либо уменьшение априорных интенсивностей переходов в другие от сигнализируемой ИСП ситуации; либо повышение априорных интенсивностей переходов из других ситуаций в сигнализируемую изменившим свое состояние ИСП. Оба варианта примерно равнозначны, однако второй более предпочтителен в связи с тем, что при последующих изменениях сигнально-помеховой обстановки его применение быстрее приводит весь массив оперативно корректируемой априорной информации к соответствию фактической в текущей сессии применения ИИУС. В соответствии со вторым вариантом предлагаемой оперативной коррекции априорной информации выражение (5) имеет вид

$$\hat{P}_k^{(s)} = \left[\hat{P}^{(s)} - \Delta t \left(\hat{P}^{(s)} \sum_{s=1 \neq l}^S \tilde{\gamma}^{(sl)} - \sum_{l=1 \neq s}^S D \tilde{\gamma}^{(ls)} \hat{P}^{(l)} \right) \right]_{k-1} ; \quad D = 1 + d\Delta\tau. \quad (9)$$

В соответствии с (9) повышаются числовые значения априорных интенсивностей переходов в те сигнально-помеховые ситуации, о которых сигнализирует изменивший свое состояние ИСП, при этом остальные предварительно рассчитанные интенсивности переходов в другие сигнально-помеховые ситуации в текущий момент времени остаются неизменными. Скорректированные в соответствии с (9) числовые значения интенсивностей переходов $\tilde{\gamma}^{(ls)}$ запоминаются для последующего использования в текущей сессии применения ИИУС.

Заключение

Новые существенные признаки предлагаемого метода:

1. Использование ИСП сигналов и помех для оперативной коррекции априорной информации, которой являются предварительно рассчитанные интенсивности переходов только между теми сигнально-помеховыми ситуациями, о которых сигнализируют индикаторы в текущий момент времени;
2. Повышение числовых значений априорных интенсивностей переходов только между теми сигнально-помеховыми ситуациями, о которых сигнализируют индикаторы в текущей сессии применения ИИУС;
3. Повышение степени соответствия априорной и фактической интенсивностей переходов между сигнально-помеховыми ситуациями при очередном изменении состояния какого-либо из индикаторов для текущей сессии применения ИИУС.

Информационные системы с открытыми входными каналами весьма часто функционируют в условиях сложной и изменчивой сигнально-помеховой обстановки. Для корректного функционирования информационных систем априорная информация о характеристиках помех становится особенно актуальной при их большой интенсивности. Для случая, когда априорная информация является ложной, в статье предложен метод оперативной коррекции ее веса в алгоритме распознавания сложившейся в текущий момент времени сигнально-помеховой ситуации и, соответственно, управления структурами информационной системы. Поиск правил решения (алгоритмов обработки информации), обеспечивающих минимизацию условного риска при изменяющихся параметрах сигналов и помех в процессе функционирования ИИУС объектов (процессов), является актуальной задачей.

Список литературы

1. Баранов, И. В. Влияние помех на алгоритмы обработки сигнала разностной частоты дальномера ближнего действия / И. В. Баранов, В. В. Езерский // Цифровая обработка сигналов. – 2022. – № 1. – С. 14 – 18.
2. Казаков, И. Е. Анализ систем случайной структуры / И. Е. Казаков, В. М. Артемьев, В. А. Бухалёв. – М. : Физматлит, 1993. – 272 с.
3. Муромцев, Д. Ю. Анализ и синтез радиосистем на множестве состояний функционирования / Д. Ю. Муромцев, Ю. Л. Муромцев // Вест. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 2. – С. 241 – 251.
4. Bayesian Recognition of Amovingobjectin Formation-Measuring System State: Aprioriin Formation Weight Correction / S. M. Muzhichek, G. G. Sebyakov, V. I. Pavlov, S. V. Tolstych, M. B. Kenzhekhanova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 2020 Workshopon Materials and Engineeringin Aeronautics (MEA2020). – P. 1 – 5.
5. Бухалёв, В. А. Рекуррентные алгоритмы распознавания и оценивания состояния динамического объекта по информации от измерителей и индикаторов / В. А. Бухалёв // Известия Академии Наук СССР. Техническая кибернетика. – 1992. – № 1. – С. 148 – 156.
6. Павлов, В. И. Оптимальное обнаружение изменения свойств случайных последовательностей по информации измерителя и индикатора / В. И. Павлов // Автоматика и телемеханика. – 1998. – № 1. – С. 86 – 94.

Operational Correction of the Weight of a Priori Information in the Bayesian Algorithm for State Recognition of the Information-Measuring and Control System

V. I. Pavlov^{1✉}, T. Yu. Dorokhova¹, S. V. Artemova², S. V. Tolstykh¹

Department of Design of Radio-Electronic and Microprocessor Systems (1),

vpavl@mail.ru; TSTU, Tambov, Russia;

KB-1 Department of Information Protection (2),

MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

Keywords: a priori information; information-measuring and control system; operational correction.

Abstract: The paper proposes a new method of operative correction of a priori information weight in Bayesian algorithm of state recognition of information-measuring and control system, increasing its noise immunity. The method uses so-called indicators of accompanying signs of signals and interference. The sign of inconsistency with the validity of a priori information in the current session of the information system functioning is indicated. The proposed method is universal and is applicable, including to information systems with open input channels.

References

1. Baranov I.V., Yezerskiy V.V. [Effect of interference on algorithms for processing the difference frequency signal of a short-range rangefinder], *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital signal processing], 2022, no. 1, pp. 14-18. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Kazakov I.Ye., Artem'yev V.M., Bukhalov V.A. *Analiz sistem sluchaynoy struktury* [Analysis of random structure systems], Moscow: Fizmatlit, 1993, 272 p. (In Russ.)
3. Muromtsev D.Yu., Muromtsev Yu.L. [Analysis and synthesis of radio systems on a set of operating states], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2008, vol. 14, no. 2, pp. 241-251. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Muzhichek S.M., Sebyakov G.G., Pavlov V.I., Tolstykh S.V., Kenzhekhanova M.V. Bayesian Recognition of Amovingobjectin Formation-Measuring System State: Aprioriin Formation Weight Correction, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 2020 Workshopon Materials and Engineeringin Aeronautics (MEA2020)*, pp. 1-5.
5. Bukhalov V.A. [Recursive Algorithms for Recognizing and Estimating the State of a Dynamic Object Based on Information from Measuring Instruments and Indicators], *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Tekhnicheskaya kibernetika* [Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Technical Cybernetics], 1992, no. 1, pp. 148-156 (In Russ., abstract in Eng.)
6. Pavlov V.I. [Optimal detection of changes in the properties of random sequences based on information from a meter and indicator], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Telemechanics], 1998, no. 1, pp. 86-94 (In Russ., abstract in Eng.)

Operative Korrektur des Gewichts der Apriori-Informationen im Bayes'schen Algorithmus zur Erkennung des Zustands des informationsmessenden und Steuersystems

Zusammenfassung: Es ist eine neue Methode zur operativen Korrektur des Gewichts von A-priori-Informationen im Bayes'schen Algorithmus zur Zustandserkennung des Informationsmess- und Steuerungssystems vorgeschlagen, wodurch dessen Störfestigkeit erhöht wird. Das Verfahren nutzt sogenannte Indikatoren für Begleitzeichen von Signalen und Störungen. Es ist auf das Zeichen der Unstimmigkeit der a priori Gültigkeit der Information in der aktuellen Phase der Funktion des Informationssystems hingewiesen. Die vorgeschlagene Methode ist universell und anwendbar, auch auf Informationssysteme mit offenen Eingabekanälen.

Correction rapide du poids des informations a priori dans l'algorithme bayésien de reconnaissance de l'état du système d'information, de mesure et de contrôle

Résumé: Est proposée une nouvelle méthode de correction rapide du poids de l'information a priori dans l'algorithme bayésien de reconnaissance de l'état du système d'information, de mesure et de contrôle, ce qui augmente sa résistance aux interférences. Dans la méthode sont utilisés les indicateurs dits de signes concomitants de signaux et d'interférences. Est indiqué un signe d'incohérence dans la validité des informations a priori lors de la session en cours du système d'information. La méthode proposée est universelle et applicable, notamment aux systèmes d'information avec des canaux d'entrée ouverts.

Авторы: *Павлов Владимир Иванович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; *Дорохова Татьяна Юрьевна* – кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВО «ТГТУ, Тамбов, Россия; *Артемova Светлана Валерьевна* – доктор технических наук, профессор кафедры КБ-1 «Защита информации», ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», Москва, Россия; *Толстых Сергей Владимирович* – аспирант кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВО «ТГТУ, Тамбов, Россия.

СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ РЕЛЬСОВЫХ СКРЕПЛЕНИЙ НА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ НА ОСНОВЕ ГЛУБОКОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

С. П. Орлов✉, Н. А. Ефимушкин, Н. В. Ефимушкина

*Кафедра вычислительной техники, orlovsp1946@gmail.com,
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»,
Самара, Россия*

Ключевые слова: глубокое обучение; диагностика; искусственная нейронная сеть; распознавание изображений; рельсовые скрепления.

Аннотация: Представлена система диагностики состояний рельсовых скреплений железнодорожных путей по видеоматериалам, полученным вагоном-путеизмерителем. Выявлено множество классов наиболее существенных дефектов рельсовых скреплений, влияющих на надежность движения составов. Система диагностики реализована на основе предварительно обученной нейронной сети модели SSD Mobilenet v3 Small COCO. Выполнен анализ метрик при распознавании дефектов скреплений. Приведены графики основных метрик нейронной сети при распознавании рельсовых скреплений в зависимости от числа эпох обучения. Показано, что предлагаемая система диагностики обеспечивает точность определения дефектов не ниже 0,96. Высокая точность достигнута предварительной обработкой кадров датасета рельсового пути: разворота, масштабирования и разметки изображений.

Введение

Обеспечение безопасности перевозок – одна из важнейших задач Российских железных дорог. Для высокоскоростных магистралей существенную роль играет состояние элементов железнодорожных путей, в частности, рельсовых скреплений. Они предназначены для фиксации рельсов на шпалах и обеспечения электроизоляции на железнодорожных участках с электрической тягой и автоматической блокировкой [1]. Скрепления обеспечивают поддержание геометрических параметров пути: ширины колеи, уровня высоты, параллельности и вертикальности рельсов и шпал.

Автоматизация диагностики состояний рельсовых скреплений является новым направлением в оценке исправности железнодорожных элементов и конструкций. В настоящее время для мониторинга железнодорожных путей используются вагоны-путеизмерители, представляющие передвижные лаборатории с оборудованием для видеосъемки рельсов [2]. Однако контроль рельсовых скреплений в реальном времени операторами невозможен. Актуальной является задача создания средств для автоматического анализа рельсовых скреплений и обнаружения их дефектов.

В статьях [3, 4] дано описание интеллектуальных систем для анализа рельсовых стыков и контактной сети железной дороги. Предлагаемая интеллектуальная система диагностики рельсовых скреплений является прямым развитием результатов работы [5]. Формирование исходных данных осуществляется так же, как

в работах [3, 5], с использованием изображений, полученных вагоном-путеизмерителем. Однако подход, использованный в работе [4] для оценки состояний элементов контактной сети, позволяет более точно определять положение рельсовых креплений и их элементов, а также выявлять большее число дефектов. В настоящей статье указанный подход реализован для контроля высокоскоростного железнодорожного пути.

Методика оценки технического состояния рельсовых креплений

Диагностика рельсовых креплений проводится по видеокадрам, получаемым с видеокамер вагона-путеизмерителя. В нижней части вагона установлены четыре видеокамеры (по две камеры на каждый рельс) для съемки элементов железнодорожного пути. Видеопоток разбивается на кадры, при этом каждое изображение в кадре содержит 500 линеек пикселей, что обеспечивает соответствие одного пикселя одному миллиметру железнодорожного пути. Изображения помещаются в специальный файл, причем каждый кадр содержит как минимум одно крепление.

Предлагаемая методика автоматической диагностики рельсовых креплений заключается в следующем.

1. Подсистема препроцессинга по полученным кадрам определяет путевую координату крепления с точностью до миллиметра и формирует файл изображений с контролируемыми креплениями.

2. Выполняется обработка кадров с целью детекции положения рельсового крепления на изображении и формируется датасет для обучения нейронной сети, содержащий обучающую, валидационную и тестовую выборки.

3. Проводится обучение глубокой предобученной нейронной сети на тренировочных изображениях рельсовых креплений с размеченными типами дефектов.

4. Затем обученная нейронная сеть выявляет дефекты рельсовых креплений при движении вагона-путеизмерителя по участку пути в реальном времени.

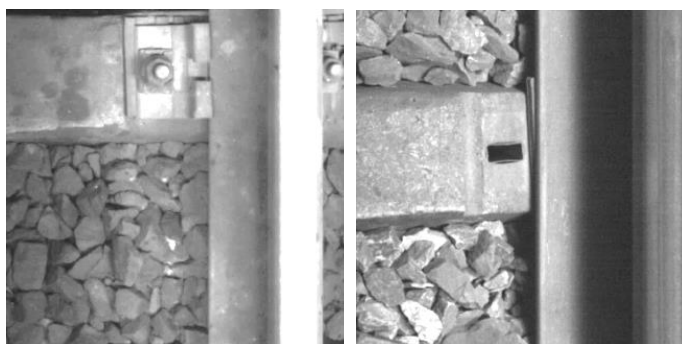
Основная задача при создании системы диагностики рельсовых креплений заключается в обеспечении высокой скорости работы нейронной сети при прохождении вагона-путеизмерителя по участку железной дороги. В этом случае возможно получение результатов в реальном времени, что позволяет сразу принимать решения о мероприятиях по ремонту рельсового пути, вплоть до остановки движения поездов. Главным критерием при этом является обеспечение высокой надежности рельсового пути, особенно для высокоскоростных магистралей.

Типы рельсовых креплений и их дефекты

В настоящее время наиболее распространенными типами креплений на российских железных дорогах и в странах СНГ являются клеммно-болтовые (КБ), анкерные (АРС), железобетонные (ЖБР) и крепления для деревянных шпал (ДО) [1]. Первые три вида применяются для крепления рельсов к железобетонным шпалам и отличаются способом фиксации. Так, крепление рельсов может осуществляться болтами (КБ, ЖБР), анкерами (АРС) или гвоздями (ДО). При длительном использовании в рельсовых креплениях могут возникать различные дефекты, связанные с крепежными компонентами, подкладкой, клеммой и другими элементами. Дефекты могут выводить крепление из строя полностью или частично, и, как результат – происходит авария. На рисунке 1 приведены примеры дефектов рельсовых креплений.

При анализе состояния рельсовых креплений по изображениям, полученным вагоном-путеизмерителем, выполняется оценка следующих параметров:

- 1) наличие или отсутствие рельсового крепления в кадре;
- 2) тип крепления (КБ, АРС, ЖБР или ДО);



а)

б)

Рис. 1. Дефекты рельсовых креплений:

а – крепление КБ с отсутствующей клеммой;

б – изображение полностью отсутствующего крепления

3) тип дефекта, если дефект имеется (у одного крепления может быть сразу несколько дефектов);

4) число крепежных элементов;

5) координаты крепления в системе кадра;

6) путевая координата крепления.

Изображения рельсовых креплений получены при прохождении вагона-путеизмерителя на нескольких российских железных дорогах: Московской, Куйбышевской, Октябрьской, Горьковской, Свердловской, Юго-Восточной и Южно-Уральской. Съемка проводилась в теплое время года (с мая по сентябрь) при сухой и солнечной погоде. Длина участков дорог, по которым сформированы данные, составляла от 5 до 20 км. В процессе съемки вагон-путеизмеритель перемещался со скоростью 90...100 км/ч.

Нейронная сеть для анализа изображений с рельсовыми креплениями

Для контроля состояния рельсовых креплений использована предварительно обученная нейронная сеть SSD Mobilenet v3 Small COCO из зоопарка моделей Tensorflow-1 [6]. Модель SSD обучена на датасете COCO и показала высокую эффективность при мониторинге контактной сети железной дороги [4].

На первом этапе необходимо определить координаты крепления на изображении в кадре. Нейросетевой детектор способен достаточно хорошо распознавать крупные объекты (площадью более 8000 пикселей) при большом количестве данных (порядка нескольких тысяч объектов на класс). Изображения, сформированные путеизмерителем, объединены в 19 классов. Каждый класс описывает элемент или один из возможных дефектов крепления.

Для обеспечения высокого качества распознавания изображения, сформированные путеизмерителем, предварительно обрабатываются. При этом выполняется разметка кадров изображений программой Labelimg [4, 7], которая позволяет выделять в кадре наиболее важные прямоугольные объекты и определять координаты этих прямоугольников. На рисунке 2 приведены примеры разметки объектов с помощью Labelimg. Именно такие области модель SSD MobileNet отыскивает на передаваемых ей изображениях.

Названия меток, а также число входящих в них объектов приведены в табл. 1. Весь датасет содержит 14 966 изображений, на которых выделены 45 763 области, при этом 4 776 кадров содержат дефекты.

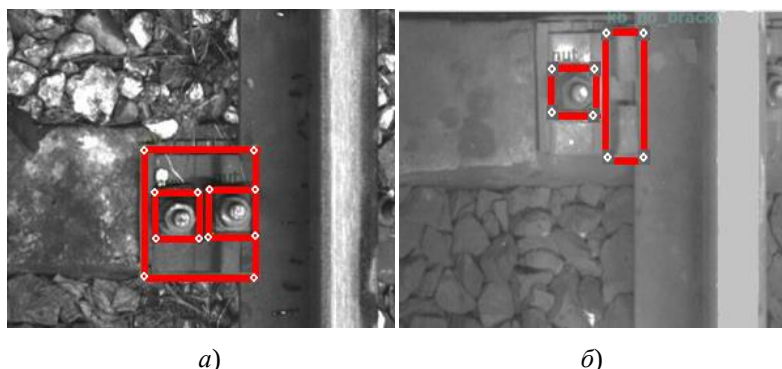


Рис. 2. Пример разметки крепления КБ:
а – исправное крепление; *б* – крепление с отсутствующей клеммой

Таблица 1

Описание классов рельсовых креплений

Идентификатор класса	Классы	Число объектов
ars_mono	Монорегулятор (АРС)	1244
ars_no_mono	Отсутствующий монорегулятор (АРС)	855
bind_missing	Отсутствующее крепление	143
bolt_unscrewed	Открученная гайка (КБ)	306
do	Скрепление типа ДО	1830
hole_do	Отсутствие костыля (ДО)	616
hole_square	Отсутствие крепежного болта (КБ)	805
jbr_bracket	Скоба крепления ЖБР	1083
jbr_defect2	Отсутствие клеммы (ЖБР)	56
jbr_nut	Крепежный болт (ЖБР)	176
jbr_plate	Отсутствие крепежного болта (ЖБР)	88
kb	Скрепление типа КБ	10644
kb105	Клемма ОП-105 (КБ)	793
kb105_defect	Дефект крепежного болта клеммы ОП-105 (КБ)	526
kb_no_bracket	Отсутствие клеммы (КБ)	1240
kb_twist	Разворот подкладки крепления (КБ)	773
nail_pulled	Наддернутый костыль (ДО)	156
nut	Крепежный болт (КБ)	21895
spring	Клемма крепления (АРС, ЖБР)	2534

Используемый в предлагаемой работе подход совместного анализа выделенных на изображении объектов (элементов крепления или дефектов) позволяет получить полную информацию о состоянии крепления.

Настройка и обучение модели

Перед началом обучения осуществляется проверка корректности разметки и удаление лишних данных, сформированных программой Labelimg. Изображения датасета приведены к формату «рельс справа» поворотом кадров на 180° . На рисунке 3 показан пример применения представленной операции. Для видеокамер, осуществляющих съемку рельса слева, разворот не выполняется. Поэтому такая операция проводится только для кадров, полученных видеокамерами с правой стороны.

Приведение кадров к формату «рельс справа» обеспечивает более эффективное распознавание объектов креплений. Полученные результаты детектирования интерпретируются относительно исходного положения изображения (рис. 3, а).

Для анализа корректности выделения прямоугольных областей и отнесения их к соответствующим классам построены графики зависимости параметров областей от размера выборки. Наиболее важными считаются следующие параметры размеченных рамок: площадь, отношение ширины к высоте, частота появления в одном кадре, ширина и высота. На рисунке 4 приведен пример таких графиков для класса `kb_no_bracket`. Графики демонстрируют зависимости перечисленных характеристик от номера объекта, а для частоты появления области – от номера картинки.

Характер кривой зависимости параметра областей от размера выборки должен быть относительно плавным. Наличие отклонений параметра от среднего значения, как в меньшую, так и большую сторону, может свидетельствовать о неправильно размеченной области. Кадры с такими рамками при необходимости корректируются.

Набор исходных данных разбит на обучающую и тестовую выборки. Первая содержит 90 % изображений, вторая – 10 %. В работе использовано расширение датасета генерацией дополнительных кадров. Оно применяется только для обучающей выборки. Для кадров, содержащих дефекты рельсовых креплений, получены дополнительные изображения вертикальным разворотом. При выполнении операции разворота пиксели кадра преобразуются по формуле: $x' = x, y' = h - y$, где x' и y' , x и y – координаты пикселя в преобразованном и исходном изображениях соответственно; h – высота изображения.

Кроме вертикального разворота кадров использована операция их масштабирования `ssd_random_crop` [8]. Масштабирование выполняется средствами TensorFlow Object Detection API и применяется для генерации новых кадров в обучающей выборке.

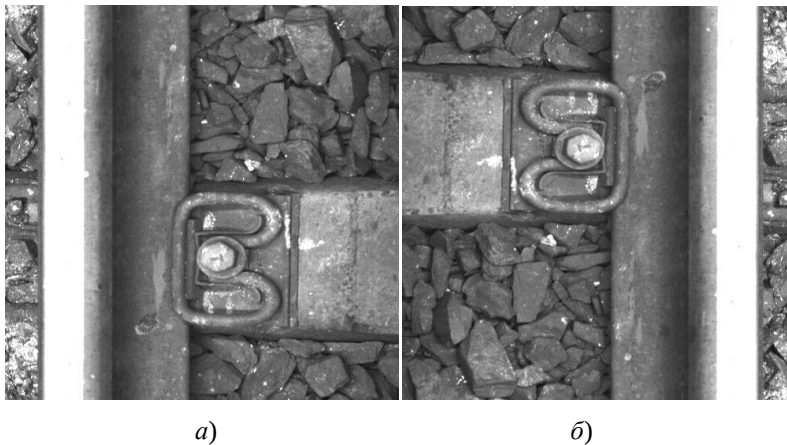


Рис. 3. Изображение рельсового крепления:
а– до разворота на 180° , б– после разворота

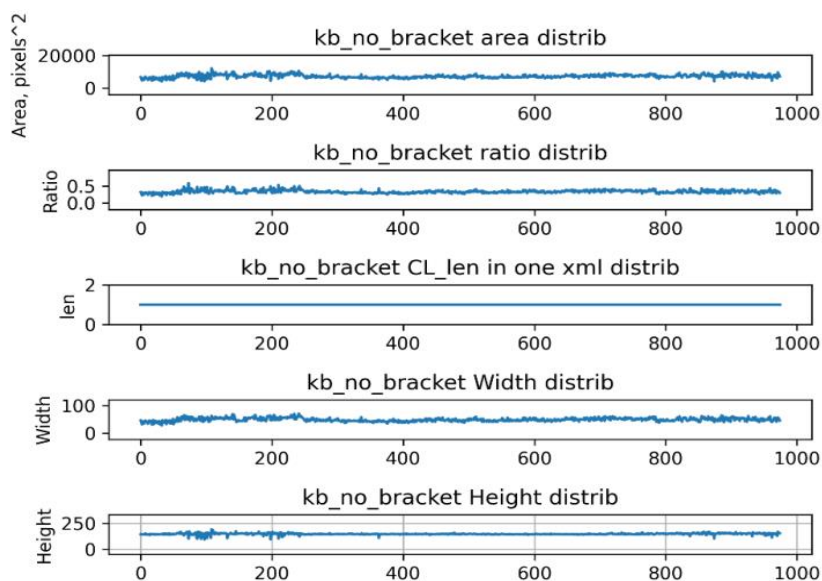


Рис. 4. Графики контролируемых параметров области для класса kb_no_bracket

Таблица 2

Скорость обучения нейронной сети

Номера шагов обучения	1 – 4999	5000 – 9999	10000 – 49999	50000 – 99999	100000 – 200000
Скорость обучения	0,001	0,0005	0,0002	0,0001	0,00005

Вначале выполняется масштабирование, при котором уменьшается размер картинки на величину, определяемую случайным образом. Результат преобразуется к размерам кадров датасета билинейной интерполяцией. Генерация нового изображения с использованием масштабирования не применяется к кадрам, полученным вертикальным разворотом.

Для обучения детектора SSD использованы средства фреймворка Tensorflow Object Detection API. Изображения обучающей выборки сжаты до размеров 300×300 пикселей и представлены в оттенках серого. Максимальное количество шагов обучения выбрано равным 200000. Изображения передаются детектору батчами, каждый из которых содержит 64 кадра. В процессе обучения модели использован оптимизатор Адам с переменной скоростью обучения (табл. 2).

При обучении архитектура нейронной сети SSD MobileNet v3 small COCO использована практически в неизменном виде: модифицированы только слои предсказания прямоугольных областей и классов. Изменения выполнены автоматически в соответствии с числом классов в наборе данных, указанным в файле конфигурации config.

Результаты обучения

Для отслеживания основных метрик качества работы модели на заданных этапах тренировки использована панель Tensorboard, на которой строились графики изменения критериев COCO detection metrics в зависимости от номера эпохи

обучения. Наиболее важной характеристикой является среднее значение точности mAP (*англ.* mean Average Precision). Оно вычисляется как среднее из значений AP, рассчитанных для каждого класса. Кроме того, используется метрика IoU (*англ.* inter section overunion), которая количественно определяет перекрытие между прогнозируемым и истинным ограничивающими прямоугольниками на изображении. При этом величина IoU изменяется в интервале $[0,5; 0,95]$ с шагом 0,05. Метрика AP вычисляется по выражению

$$AP = \sum_{k=0}^{k=n-1} [\text{recall}(k) - \text{precision}(k+1)] \times \text{precision}(k),$$

где n – число интервалов IoU; $\text{recall}(k)$ – значение полноты для k IoU; $\text{precision}(k)$, $\text{precision}(k+1)$ – значения точности для k и $(k+1)$ IoU соответственно.

Графики, полученные для средней точности mAP в зависимости от эпохи обучения, приведены на рис. 5. Для классического mAP на момент завершения обучения получено значение 0,72, а для метрики mAP при IoU = 0,5 – точность 0,96, которая близка к идеальным результатам.

На рисунках 5 – 7 обозначение 1 соответствует графику точных значений рассматриваемой метрики, обозначение 2 – графику аппроксимированной кривой этой метрики. Аппроксимация получена методом экспоненциального скользящего среднего (*англ.* Exponential Moving Average) с параметром сглаживания $\text{smoothing} = 0,99$.

Метрика mAP не несет всю информацию о качестве распознавания нейронной сетью обучающих кадров. Дополнительно в работе проанализированы результаты, полученные для метрики полноты mAR (*англ.* mean Average Recall). Метрика mAR определяется как среднее значение AR для каждого класса. Величина IoU принимает те же значения, что и при нахождении AP. Величина AR вычисляется в этом случае по формуле

$$AR = 2 \int_{0,5}^1 \text{recall}(x) dx,$$

где x – переменная, задающая значение IoU; $\text{recall}(x)$ – значение полноты при IoU = x .

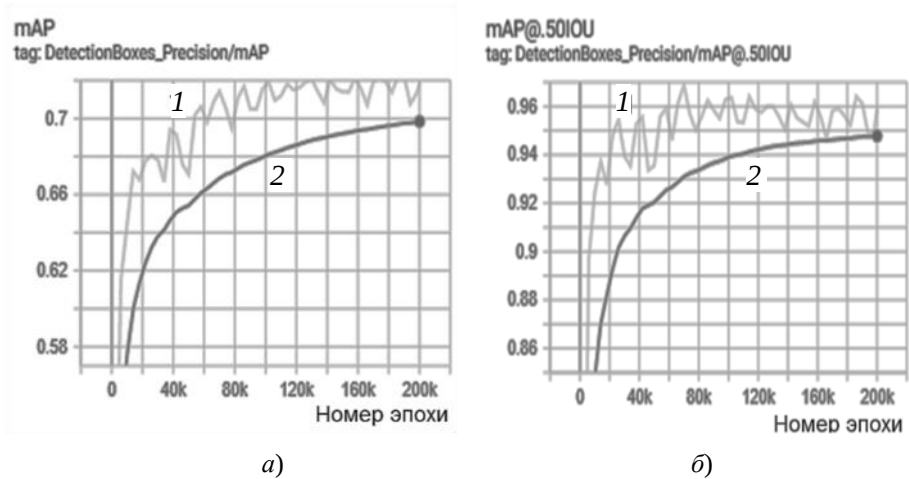


Рис. 5. Зависимости mAP от номера эпохи:
а – классическое mAR; б – mAP при IoU = 0,5

Наиболее важными являются метрики AR@10 и AR@100 (medium) для 10 самых достоверных объектов в кадре и 100 самых достоверных объектов среднего размера (см. рис. 6). Для них после завершения обучения получены значения 0,77 и 0,72 соответственно, что свидетельствует о хорошем качестве модели.

Для оценки качества обучения также построены графики функций потерь loss (см. рис. 7). Потери разделены на классификационные (classification_loss), локализационные (localization_loss) и регуляризационные (regularization_loss) компоненты.

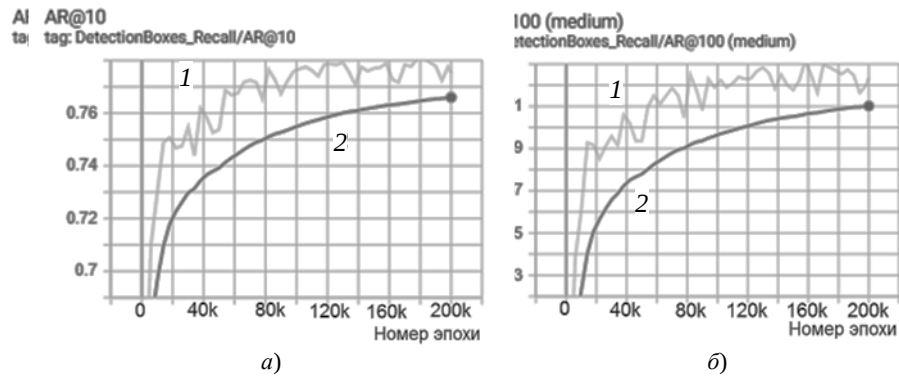


Рис. 6. Зависимости mAR от номера эпохи:
а – AR@10; б – AR@100

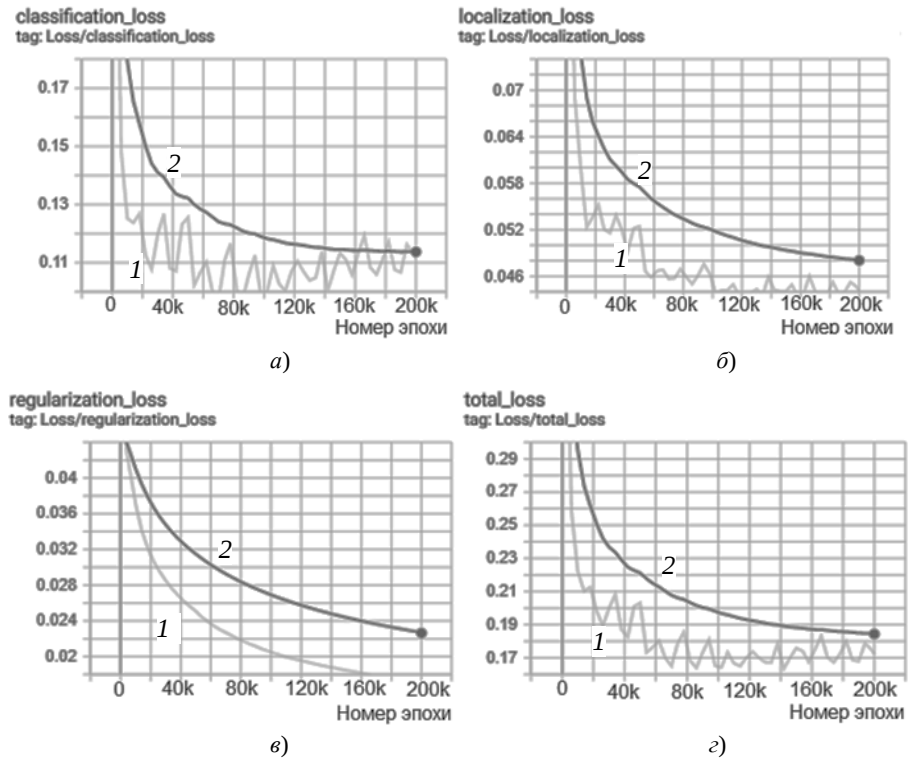


Рис. 7. Графики потерь:

а – классификационные; б – локализационные; в – регуляризационные; з – общие потери

Отметим, что зависимость общих потерь (total_loss) получена суммированием всех вышеуказанных потерь. На момент завершения обучения итоговые потери составили 0,17.

В работе используется вычисление классификационных потерь фокальной функцией [9], которая обеспечивает устранение проблемы несбалансированного датасета (различное число кадров для каждого класса). Модель неявно концентрируется на проблемных объектах. При этом проводится взвешивание каждого класса с учетом его влияния на значение потерь.

Фокальная функция потерь FL вычисляется по формуле

$$FL = - \sum_{i=1}^C \alpha_i (1 - y'_i)^\gamma \log(y'_i),$$

где C – число классов; i – номер класса; y'_i – предсказанные метки классов скреплений на кадрах; α_i – весовой коэффициент; γ – параметр фокуса.

Параметр фокуса $\gamma = 2$ – модулирующий фактор, показывающий степень уменьшения влияния на потери хорошо классифицируемых объектов. Коэффициент α_i придает вес i -му классу. Он помогает выполнять балансировку между предсказаниями о наличии и отсутствии класса объекта. При обучении принималось значение $\alpha_i = 0,75$.

Для вычисления локализационных потерь использована функция Хьюбера (Smooth MAE), которая является производной от функций MAE (англ. Mean Absolute Error) и MSE (англ. Mean Square Error) и золотой серединой между ними [10]. Функция Хьюбера менее чувствительна к значительным отклонениям данных и вычисляется по формуле

$$HL = \begin{cases} (y_{act} - y_{pred})^2 / 2 & \text{для } |y_{act} - y_{pred}| \leq \delta; \\ \delta (y_{act} - y_{pred})^2 / 2 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где y_{act} , y_{pred} – истинные и предсказанные значения координат объектов соответственно; δ – пороговое значение, $\delta = 1$ – стандартное для функции потерь Хьюбера.

Анализ достоверностей классов

Оценка качества работы обученной модели проводится метрикой F1 (FScore), вычисляемой по формуле

$$F1 = \frac{2 \times \text{precision} \times \text{recall}}{\text{precision} + \text{recall}},$$

где precision и recall – значения соответственно точности и полноты при заданных достоверности классификатора и IoU областей.

Вычисление F1 проводится для изображений в исходном разрешении (500×500). При определении метрики указывается тип выборки (валидационная или тестовая), для которой проводится оценка качества работы модели. Объект считается распознанным верно, если метрика IoU между исходной рамкой и рамкой, полученной нейросетью, больше или равна 0,5 и при этом правильно идентифицирован класс обнаруженной области.

Для каждого класса вычисляется значение метрики F1, при этом расчет precision и recall проводится для достоверностей классификатора в диапазоне от 0,1 до 0,95 с шагом 0,05. Для IoU используется постоянное пороговое значение 0,5. Таким образом, для каждого класса вычисляется несколько значений F1 при разных достоверностях.

Best f1 for class ars_mono: 1.000, reached for scores [0.5, 0.55, 0.6, 0.65, 0.7]
 Best f1 for class ars_no_mono: 1.000, reached for scores [0.55]
 Best f1 for class bind_missing: 0.929, reached for scores [0.5, 0.55, 0.6, 0.65]
 Best f1 for class bolt_unscrewed: 0.622, reached for scores [0.25]
 Best f1 for class do: 0.943, reached for scores [0.65]
 Best f1 for class hole_do: 0.909, reached for scores [0.3]
 Best f1 for class hole_square: 0.960, reached for scores [0.25]
 Best f1 for class jbr_bracket: 0.990, reached for scores [0.55]
 Best f1 for class jbr_defect2: 1.000, reached for scores [0.45, 0.5, 0.55, 0.6]
 Best f1 for class jbr_nut: 1.000, reached for scores [0.3]
 Best f1 for class jbr_plate: 0.947, reached for scores [0.3]
 Best f1 for class kb: 0.843, reached for scores [0.65]
 Best f1 for class kb105: 0.990, reached for scores [0.4, 0.45, 0.5, 0.55, 0.6]
 Best f1 for class kb105_defect: 1.000, reached for scores [0.35, 0.4, 0.45]
 Best f1 for class kb_no_bracket: 0.990, reached for scores [0.25, 0.3, 0.35]
 Best f1 for class kb_twist: 0.989, reached for scores [0.4]
 Best f1 for class nail_pulled: 0.687, reached for scores [0.35]
 Best f1 for class nut: 0.973, reached for scores [0.5]
 Best f1 for class spring: 1.000, reached for scores [0.6, 0.65, 0.7]

Рис. 8. Пороги достоверностей для классов модели

Лучшим признается порог, для которого исследуемая метрика качества имеет максимальное значение. Если таких порогов несколько, то выбирается любой из них. Результаты оценки качества работы модели сохраняются в файл `calc_thres.log`. Фрагмент полученных записей для обученного в статье детектора приведен на рис. 8, где `f1` соответствует метрике `F1`. Выбор порогов проводится по тестовой выборке изображений рельсовых креплений.

Полученные результаты показывают, что модель в целом правильно распознает различные классы креплений и их элементов. Для большинства меток метрики `F1` близки к 1. Немного хуже модель распознает класс `kb`. Средние по качеству результаты получены для дефектов `bolt_unscrewed` и `nail_pulled`. Модель распознает их хуже в связи с небольшим количеством объектов и малыми размерами областей. Также на более низкое качество детектирования этих классов указывают низкие значения достоверности – меньше 0,4 для обоих классов. Проблема может быть решена увеличением числа кадров в датасете.

Заключение

Приведены результаты использования нейросети модели `SSD MobileNet v3 Small COCO`, обученной для решения задачи оценки состояний рельсовых креплений. Исходные данные для обучения сформированы при прохождении вагономпутьеизмерителем участка железнодорожного пути. Качество распознавания областей по метрике `mAPIoU` = 0,5 достигло значения 0,96, а по метрике `AR@10` – 0,77. Модель используется для оценки состояний рельсовых креплений на железных дорогах и ориентирована в первую очередь на высокоскоростные магистрали.

Список литературы

1. Крепление рельсов: промежуточные крепления на жд пути, виды и назначение. – Текст : электрон. – URL : <https://vsp-komplekt96.ru/stati/relsovye-skrepleniya> (дата обращения: 27.12.2023).
2. Вагон-лаборатория путьеизмерительный КВЛ-П2.1 – Текст : электрон. // Инфотранс. – URL : <https://infotrans-logistic.ru/kvlp21> (дата обращения: 10.12.2023).
3. Ефимушкин, Н. А. Интеллектуальная система диагностики рельсовых стыков железнодорожного пути / Н. А. Ефимушкин, Н. В. Ефимушкина, С. П. Ор-

лов // Математические методы в технологиях и технике. – 2022. – № 1. – С. 98 – 104. doi: 10.52348/2712-8873_ММТТ_2022_1_98

4. Ефимушкин, Н. А. Интеллектуальная система контроля инфраструктуры контактной сети железной дороги / Н. А. Ефимушкин, С. П. Орлов // Системы управления и информационные технологии. – 2023. – № 3(93). – С. 60 – 65.

5. Orlov, S. Machine Learning of Diagnostic Neural Network for Railway Track Monitoring / S. Orlov, A. Piletskaya, N. Kusakina, A. Tyugashev // In: Kravets A.G., Bolshakov A.A., Shcherbakov M. (Eds.). Cyber-Physical Systems: Intelligent Models and Algorithms. Studies in Systems, Decision and Control. – Springer, Cham, 2022. – Vol 417. – P. 55 – 65. doi: 10.1007/978-3-030-95116-0_5

6. TensorFlow 1 Detection Model Zoo // Github. – URL : https://github.com/tensorflow/models/blob/master/research/object_detection/g3doc/tf1_detection_zoo.md (дата обращения: 15.12.2023).

7. Nelson, J. LabelImg for Labeling Object Detection Data // Roboflow. – URL : <https://blog.roboflow.com/labelimg/> (дата обращения: 29.12.2023).

8. SSD: Single Shot MultiBox Detector / W. Liu, D. Angelov, D. Erhan, C. Szegedy, S. Reed, C. Fu, A. Berg // European Conference on Computer Vision. Lecture Notes in Computer Science. – Springer, Cham, 2016. – Vol. 9905. – P. 21 – 37. doi: 10.1007/978-3-319-46448-0_2

9. Understanding Categorical Cross-Entropy Loss, Binary Cross-Entropy Loss, Softmax Loss, Logistic Loss, Focal Loss and all those confusing names // Raúl Gómez blog. – URL : https://gombru.github.io/2018/05/23/cross_entropy_loss/ (дата обращения: 10.02.2024).

10. Neri Van Otten. Top 8 Loss Functions Made Simple & How To Implement Them In Python // Spot Intelligence. – 2018. – URL : <https://spotintelligence.com/2023/09/25/loss-functions/> (дата обращения: 10.02.2024).

Diagnostic System for Rail Fastenings on High-Speed Railways Based on a Deep Neural Network

S. P. Orlov✉, N. A. Efimushkin, N. V. Efimushkina

*Department of Computer Technology, orlovsp1946@gmail.com;
Samara State Technical University, Samara, Russia*

Keywords: deep learning; diagnostics; artificial neural network; image recognition; rail fastening.

Abstract: The paper presents a system for diagnosing the rail fastening conditions on railway tracks based on video materials obtained using a rail measuring car. The set of classes of the most significant defects in rail fastenings affecting the reliability of the railway train movement has been identified. The diagnostic system is developed on the basis of a pre-trained neural network using the Mobilenet v3 Small COCO SSD model. The analysis of defect recognition metrics has been performed, and diagrams of the main metrics of a neural network for recognizing rail fastenings are presented depending on the number of training epochs. It is shown that the proposed diagnostic system provides an object recognition accuracy of at least 0.96. High accuracy is achieved through pre-processing of rail track dataset frames: rotation, scaling and marking.

References

1. Available at: <https://vsp-komplekt96.ru/stati/relsovye-skrepleniya> (accessed 27 December 2023).
2. Available at: <https://infotrans-logistic.ru/kvlp21> (accessed 10 December 2023).
3. Efimushkin N.A., Efimushkina N.V., Orlov S.P. [Intelligent diagnostic system for rail joints of a railway track], *Matematicheskie metody v tekhnologiiakh i tekhnike* [Mathematical methods in Technology and Engineering], 2022, no. 1, pp. 98-104. doi 10.52348/2712-8873_MMTT_2022_1_98. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Efimushkin N.A., Orlov S.P. [Intelligent control system for railway contact network infrastructure], *Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii* [Control systems and information technology], 2023, no. 3(93), pp. 60-65. (In Russ., abstract in Eng.)
5. Orlov S., Piletskaya A., Kusakina N., Tyugashev A. Machine Learning of Diagnostic Neural Network for Railway Track Monitoring, *Cyber-Physical Systems: Intelligent Models and Algorithms. Studies in Systems, Decision and Control*, Springer, Cham, 2022, vol. 417, pp. 55-65. doi: 10.1007/978-3-030-95116-0_5
6. Available at: https://github.com/tensorflow/models/blob/master/research/object_detection/g3doc/tf1_detection_zoo.md (accessed 15 December 2023).
7. Available at: <https://blog.roboflow.com/labelimg> (accessed 29 December 2023).
8. Liu W., Angelov D., Erhan D., Szegedy C., Reed S., Fu C., Berg A. SSD: Single Shot MultiBox Detector, *European Conference on Computer Vision. Lecture Notes in Computer Science*, Springer, Cham, 2016, vol. 9905, pp. 21-37. doi: 10.1007/978-3-319-46448-0_2
9. Available at: https://gombru.github.io/2018/05/23/cross_entropy_loss/ (accessed 10 February 2024).
10. Available at: <https://spotintelligence.com/2023/09/25/loss-functions/> (accessed 10 February 2024).

System der Diagnostik von Schienenbefestigungen auf Hochgeschwindigkeitsbahnen basierend auf dem tiefen neuronalen Netzwerk

Zusammenfassung: Es ist ein System zur Diagnose des Zustands von Schienenbefestigungen an Eisenbahngleisen anhand von Videomaterial vorgestellt, das von einem Gleismesswagen aufgenommen worden ist. Es sind viele Klassen der bedeutendsten Mängel an Schienenbefestigungen identifiziert, die die Zuverlässigkeit der Zugbewegung beeinträchtigen. Das Diagnosesystem ist auf Basis des vortrainierten neuronalen Netzwerks des SSD Mobilenet v3 Small COCO-Modells implementiert. Es ist die Analyse der Metriken zur Erkennung von Verbindungsfehlern durchgeführt. Abhängig von der Anzahl der Trainingsepochen sind Diagramme der wichtigsten Metriken des neuronalen Netzwerks zur Erkennung von Schienenbefestigungen dargestellt. Es ist gezeigt, dass das vorgeschlagene Diagnosesystem eine Fehlererkennungsgenauigkeit von mindestens 0,96 bietet. Die hohe Genauigkeit ist durch die Vorverarbeitung der Bilder des Schienendatensatzes erreicht: Drehen, Skalieren und Markieren der Bilder.

Système de diagnostic des liaisons ferroviaires à haute vitesse basé sur un réseau neuronal profond

Résumé: Est présenté un système de diagnostic des états des fixations des voies ferrées à partir de vidéos obtenues par le testeur de voie. Sont identifiées de nombreuses classes de défauts les plus importants des fixations de rail, affectant la fiabilité du mouvement des compositions. Le système de diagnostic est basé sur le réseau neuronal pré-formé du modèle SSD Mobilenet v3 Small COCO. Est réalisée l'analyse des métriques pour la reconnaissance des défauts de liaison. Sont présentés les graphiques des principales mesures du réseau neuronal lors de la reconnaissance des liaisons ferroviaires en fonction du nombre d'époques d'apprentissage. Est démontré que le système de diagnostic proposé offre une précision de détection des défauts d'au moins 0,96. Une grande précision est obtenue par le prétraitement des images du DataSet de la voie ferrée: inversion, mise à l'échelle et balisage des images.

Авторы: *Орлов Сергей Павлович* – доктор технических наук, профессор, кафедры вычислительной техники; *Ефимушкин Николай Андреевич* – аспирант кафедры вычислительной техники; *Ефимушкина Наталья Владимировна* – кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники, ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», Самара, Россия.

МЕТОД ОБРАБОТКИ ПЕРВИЧНЫХ ДАННЫХ ГЕЛЬ-ПРОНИКАЮЩЕЙ ХРОМАТОГРАФИИ РАСТВОРОВ КАУЧУКОВ ПРОМЫШЛЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСЧЕТА ИХ ФРАКЦИОННЫХ СОСТАВОВ

И. А. Хаустов✉, В. К. Битюков, Р. А. Романов,
А. А. Маслов, А. С. Дворникова

*Кафедра информационных и управляющих систем, haustov_ia@mail.ru;
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных
технологий», Воронеж, Россия*

Ключевые слова: алгоритм автоматизированной обработки данных; гель-проникающая хроматография; фракционный состав полимера; математическое моделирование; синтетический каучук.

Аннотация: Рассмотрен алгоритмический метод и разработано программное обеспечение для обработки результатов гель-проникающей хроматографии, предназначенные для получения расширенных знаний о фракционном составе однородного полимера на примере анализа образца синтетического каучука марки СКДТ промышленного назначения. Под фракцией полимера в работе понимается часть полимера из общей массы, которая характеризуется свойством $M_i \leq M < M_i + \Delta M$. Актуальность разработки метода получения фракционного состава однородного полимера обуславливается применением полученных данных о фракционном составе для моделирования динамики процессов полимеризации, деструкции, деполимеризации, структурирования. Полученные данные могут быть использованы в качестве начальных и текущих значений, используемых для идентификации кинетических констант химических реакций. Метод основан на использовании первичных данных в виде оцифрованной хроматографической кривой при известных значениях калибровочных зависимостей и параметров уравнения Марка–Кунна–Хаувинка.

Введение

Одним из методов моделирования процессов полимеризации, деструкции, деполимеризации и структурирования при производстве синтетических каучуков, термоэластопластов, низкомолекулярных полимеров и других является оценка фракционного состава получаемых продуктов в динамике [1 – 3]. Результат математического моделирования – полное представление исследуемого процесса о фракционном составе синтезируемого полимера, форме молекулярно-массового распределения в динамике. На основе полученных данных проводится оценка статистических моментов распределения и других оценок, например, среднеквадратичного отклонения. В отличие от метода моментов, впервые предложенного профессором Подвальным С. Л. для описания химико-технологических процессов полимеризации [4] и эффективно используемого сегодня [5 – 11], на основе которого проводится моделирование молекулярно-статистических моментов распределения, при моделировании фракционного состава можно получить дополнительные данные о модальности распределения, асимметрии и др.

Однако для идентификации кинетических констант химических реакций в рассматриваемой задаче требуется получение знаний как об исходном фракционном составе полимера, так и его составе в динамике. В этой связи разработка методов обработки информации для получения фракционного состава возможна на основе первичных данных о свойствах полимера, полученных с помощью гелепроникающей хроматографии (ГПХ) и является актуальной задачей.

Практическая область применения разрабатываемых методов – применение полученных результатов в виде программного обеспечения для решения задачи оценки фракционного состава полимеров на любом этапе синтеза при наличии экспериментальных данных ГПХ.

Для получения математической модели рассматривается кинетическая схема химических реакций. Например, в работе [2] для реакции полимеризации кинетическая схема процесса без учета реакции инициирования представлена в следующем виде:



где M – молекула мономера; P_n – макромолекула полимера, n – количество молекул мономера в полимерной цепи; k – константа скорости роста макромолекул.

Математическое описание представляется в виде системы из N билинейных дифференциальных уравнений (для изотермического режима при отсутствии других значимых реакций) вида:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} P_0(t) = -k M(t) P_0(t); \\ \dots \\ \frac{d}{dt} P_i(t) = -k M(t) P_i(t) + k M(t) P_{i-1}(t); \\ \dots \\ \frac{d}{dt} P_N(t) = k M(t) P_{N-1}(t), \end{cases} \quad (2)$$

с начальными условиями:

$$\begin{cases} P_0(0) = J_k; \\ P_i(0) = 0, i = \overline{1, N}, \end{cases} \quad (3)$$

где $P_i(t)$, $M(t)$, J_k – концентрации i -й фракции полимера, мономера и катализатора соответственно, моль/л; N – количество фракций полимера.

Для оценки кинетических констант k требуется на основе ГПХ получить фракционный состав полимера как в начальный момент времени, так и в последующие.

Тематике обработки результатов гелепроникающей хроматографии посвящено достаточно много работ [12 – 23]. Методика обработки данных ГПХ изложена в ГОСТ Р ИСО 11344–2022 [12]. Результатом обработки данных является расчет среднестатистических молекулярных характеристик молекулярно-массового распределения. Часть работ посвящена разработке методов обработки данных при использовании мультidetекторных систем. Использование мультidetекторных систем позволяет определить не только ММР полимера, но и распределение по размерам, а в случае разветвленного полимера – идентифицировать его разветвленность [13, 14]. В работе [15] рассмотрен способ расчета молекулярно-массового распределения полимера на основе использования метода динами-

ческого светорассеяния. В [16] рассмотрены процедуры индивидуальной калибровки для определения молекулярной массы подобных групп полимеров. В ряде работ рассматривается применение метода ГПХ для анализа сополимеров, например, [17], где показаны композиционно-неоднородные сополимеры, представляющие собой набор макромолекул разного состава. Другая часть работ посвящена применению метода ГПХ для анализа белков растительного и животного происхождения, полисахаридов и др. [18 – 20]. В публикациях [21 – 23] рассматривается применение математических методов обработки хроматограмм в целях получения новых знаний или коррекции данных хроматограмм исследуемых объектов. В статье [21] исследована проблема нахождения приближенного решения некорректно поставленных задач, возникающих при обработке экспериментальных данных. Объектом исследования является обратная задача восстановления функции распределения активных центров по приближенным значениям экспериментальных гель-хроматограмм полимерных материалов. В публикациях [22, 23] рассмотрены методы корректировки ГПХ с учетом приборного уширения и размывания хроматограмм.

Несмотря на достаточно глубокую проработку тематики исследований по обработке данных ГПХ, оценке фракционного состава гомогенного полимера уделялось недостаточно внимания.

Развитие методов обработки данных ГПХ для оценки фракционного состава полимера связано прежде всего с появлением высокоскоростных вычислительных систем и возможности моделировать динамику химических реакций высокомолекулярных соединений на основе обработки больших данных.

Исходные данные

На рисунке 1 и в таблице 1 представлены примеры обработки данных в результате ГПХ.

В таблице 1 приведены результаты промежуточного расчета, полученные при использовании системы хроматографического анализа Breeze; отражены численные значения результатов анализа: столбец 2 – молекулярная масса полимера, которая рассчитывается на основе параметров уравнения, задающего калибровочную кривую, в столбце 3 – то же, только в логарифмических координатах, 4 – объем истечения элюента (в других системах это может быть время истечения), в столбце 5 – площадь участка дифференциального молекулярно-массового распределения, в 6 – значение весовых долей полимерных макромолекул, отнесенные к величине интервала молекулярной массы в логарифмических координатах, 7 – массовая доля полимера, прошедшая через хроматографическую колонку [24].

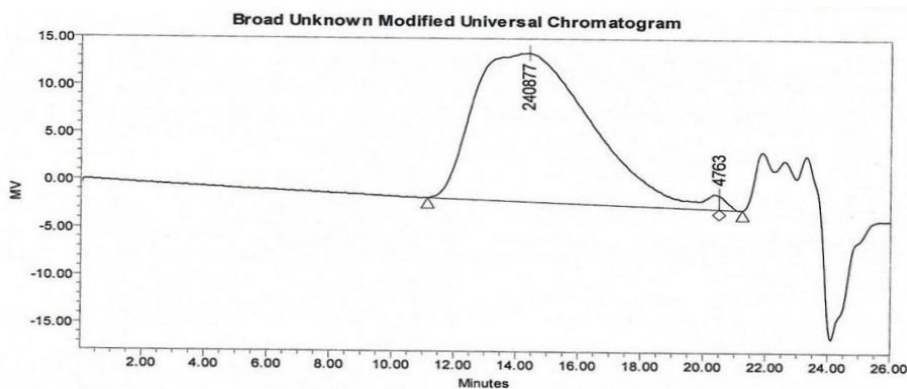


Рис. 1. Пример гель-хроматограммы анализа полимера

Таблица 1

Результаты гелепроникающей хроматографии образца полимера

№ п/п	Slice MW (Daltons)	Slice log MW	Slice Volume, mL	Slice Area	dwt/d, logM	Cumulative, %	Slice [η], dl/g	Outside Vo-Vt
1	1750330	6,243120	11,933	41022	0,095501	1,000	9,691671	No.
2	1462839	6,165197	12,114	41022	0,161321	2,000	8,558528	No.
3	1297419	6,113080	12,240	41022	0,219178	3,000	7,875608	No.
4	1180832	6,072188	12,340	41022	0,267783	4,000	7,378122	No.
...	...	...	...	...	...	...	...	
n								

Broad Unknown Modified Universal Peak Table

	Distribution Name	Mv (Daltons)	K (dl/g)	alpha	Intrinsic Viscosity (dl/g)	Mn (Daltons)	Mw (Daltons)	MP (Daltons)	Mz (Daltons)	Mz+1 (Daltons)
1		296957	0.000457000	0.693000	2.451885	98544	342620	240877	734303	1168103
2		4048	0.000457000	0.693000	0.144457	3992	4058	4763	4118	4173

Broad Unknown Modified Universal Peak Table

	Polydispersity	Mz/Mw	Mz+1/Mw	K (dl/g)	alpha	Intrinsic Viscosity (dl/g)
1	3.476817	2.143199	3.409322	0.000457000	0.693000	2.451885
2	1.016326	1.014889	1.028521	0.000457000	0.693000	0.144457

Рис. 2. Пример результатов ГПХ с полученными значениями молекулярных характеристик

Пример результатов ГПХ с полученными значениями молекулярных характеристик представлен на рис. 2, где *Polydispersity* – коэффициент полидисперсности; *K* и *alpha* – константы зависимости Марка–Кунна–Хаувинка; *Intrinsic Viscosity* – значение характеристической вязкости фракций полимера.

Поскольку узлы разбиения молекулярно-массового распределения неравностоящие (см. табл. 1), то информацию о фракционном составе полимера получить напрямую, не применяя специальную математическую обработку данных, не представляется возможным.

Разработка алгоритма

Задача расчета молекулярно-статистических характеристик по результатам ГПХ обуславливается необходимостью получить по ним фракционный состав полимера [1]. Данные оценки фракционного состава используются для получения и идентификации математических моделей процессов полимеризации, структурирования, деструкции, деполимеризации [1 – 3]. При этом расчетные данные среднечисленной, средневзвешенной и других молекулярных масс используются для их сравнения с числовыми оценками, полученными в процессе ГПХ. Таким образом, алгоритм получения оценок этих характеристик непосредственно связан с расчетом фракционного состава полимера, который представляет собой распределение количества полимера по молекулярной массе. В данном случае рассмат-

ривается дискретное распределение. Под фракцией полимера, будем понимать часть полимера из общей массы, которая характеризуется свойством $M_i \leq M < M_i + \Delta M$.

В общем виде алгоритм получения фракционного состава представлен следующими действиями:

1) в качестве первичных данных используются данные ГПХ – результаты детекции концентрации полимера в зависимости от времени его истечения (рис. 3) По оси ординат размерность в милливольтках – результат детекции, например, рефрактометрическим датчиком, значения косвенно связаны с концентрацией полимера; по оси абсцисс – время истечения элюента. Для получения этих значений в цифровом виде используются программы для оцифровки графиков. Конечный результат – двумерный массив данных $\{Y_i, t_i; i = \overline{1, m}\}$, m – число узлов оцифровки (см. рис. 3);

2) на втором этапе проводится корректировка ГПХ с учетом ухода нуля линии $Y = Y - Y_k$, где $Y_k = a + b \cdot t$ (см. рис. 3, а). На рисунке 3, б, получена откорректированная ГПХ;

3) на следующем этапе проводится интегрирование данных ГПХ, количественная оценка площади подынтегральной кривой принимается за 100 %. В данном случае используется численный метод, например, метод трапеций

$$S = \int_{t_n}^{t_k} Y(t) dt \approx \sum_{i=1}^{m-1} \left(\frac{Y_i + Y_{i+1}}{2} \right) \Delta t_i, \quad (4)$$

где Δt_i – интервал интегрирования на i -м узле;

4) переход в метрику $\lg(M)$ осуществляется по данным калибровочной зависимости Бенуа с учетом широко известного уравнения Марка–Кунна–Хаувинка [14]:

$$\lg(M(V)) = \frac{f(V) + \lg(K)}{1 + \alpha}; \quad (5)$$

$$f(V) = \sum_{k=0}^n a_k V^k, \quad (6)$$

где a_k – параметры степенного многочлена калибровочной зависимости, уникальные для хроматографических колонок одного типа применительно для каждой пары «полимер – растворитель»; n – порядок полинома.

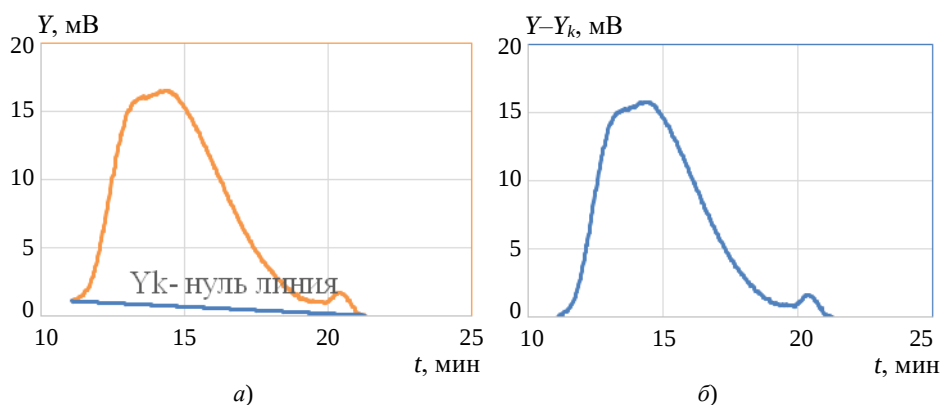


Рис. 3. Результаты детекции концентрации полимера в зависимости от времени его истечения:

а – корректировка нуля линии; б – откорректированная ГПХ с учетом ухода нуля линии

Поскольку скорость прокачки элюента через хроматографическую колонку постоянна и равна 1 мл/мин для рассматриваемых хроматографических систем, то в зависимостях (5), (6) можно использовать в качестве аргумента функций время истечения вместо объема истечения, то есть $t \equiv V$ с точки зрения их численных оценок.

5) переход в метрику молекулярных масс

$$M_i = 10^{\lg(M(V_i))}, \quad i = \overline{1, m}; \quad (7)$$

6) расчет интерполяционных коэффициентов семейства $(m-1)$ линейных функций $Y_i(M)$, определенных на интервалах $[M_i, M_{i+1}] \forall i = \overline{1, m-1}$;

7) расчет количества фракций полимера $N = \frac{M_{\max}}{\Delta M}$. Разметка оси молекулярных масс через одинаковые интервалы ΔM , получение межтабличных значений $Y(M_j)$, формирование множества $\{Y_j, M_j; j = \overline{1, N+1}\}$;

8) обратный переход к логарифмической системе координат по оси абсцисс. Получение оценок $\lg(M_j)$;

9) оценка времени истечения элюента t_j в узлах новой разметки, $f: M \rightarrow T$, где $M = \{M_j; j = \overline{1, N+1}\}$, $T = \{t_j; j = \overline{1, N+1}\}$ – множества, характеризующие время истечения элюента для соответствующей молекулярной массы; f – итеративная процедура обработки данных, связанная с решением $N+1$ нелинейных уравнений $\varphi(t_j) = 0$, где $\varphi(t_j) = \sum_{k=0}^n a_k(t_j)^k - \lg(M_j)$, $\forall j = \overline{1, N+1}$;

10) расчет доли W_j j -й фракции на интервале молекулярных масс $[M_j, M_{j+1}]$, $\forall j = \overline{1, N}$,

$$W_j = \frac{(Y_j + Y_{j+1})(t_{j+1} - t_j)}{\sum_{r=1}^N (Y_r + Y_{r+1})(t_{r+1} - t_r)}. \quad (8)$$

На рисунке 4 представлен график, характеризующий фракционный состав образца каучука СКДТ, количество фракций 8958, дискретность фракционирования $\Delta M = 500$.

Для подтверждения достоверности оценок фракционного состава, используя (9), (10), получены расчетные данные молекулярно-массовых параметров в сравнении с результатами ГПХ:

$$M_w = \sum_{r=1}^N (W_r M_r); \quad (9)$$

$$M_n = \frac{1}{\sum_{r=1}^N \left(\frac{W_r}{M_r} \right)}. \quad (10)$$

Результаты расчета среднечисленной M_n и средневзвешенной M_w молекулярных масс полимера следующие: по данным ГПХ – 98544 и 342620 соответственно; полученные после обработки ГПХ, используя данные о фракционном составе в сравнении с данными ГПХ – 102157 и 335347.

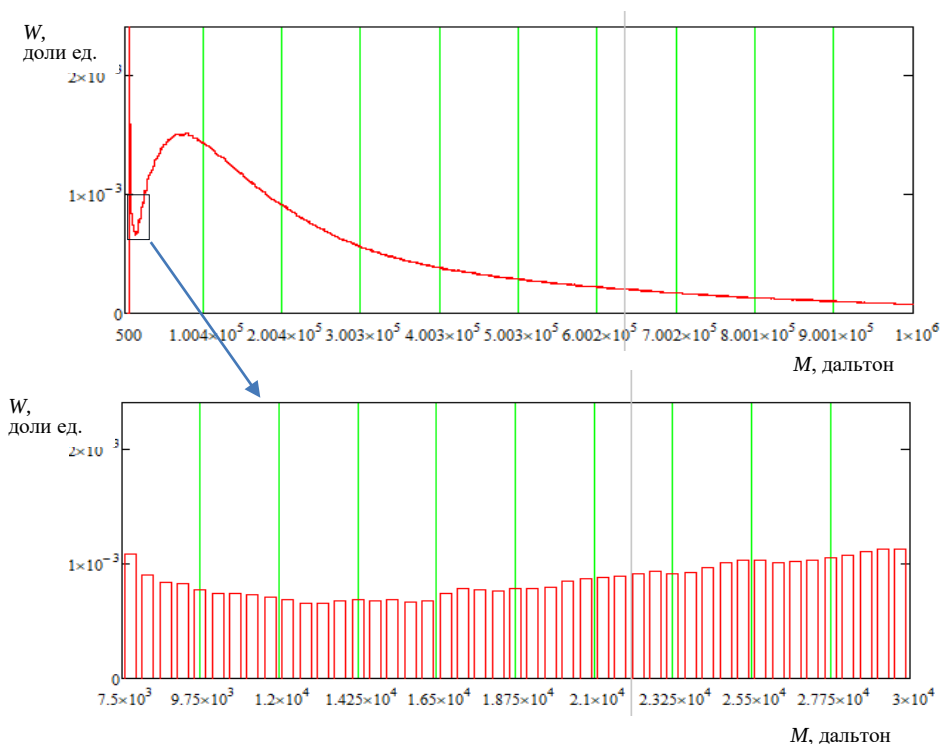


Рис. 4. Расчетный фракционный состав образца каучука СКДТ

Средняя относительная приведенная погрешность расчета обоих средних молекулярных масс составила менее 1 %.

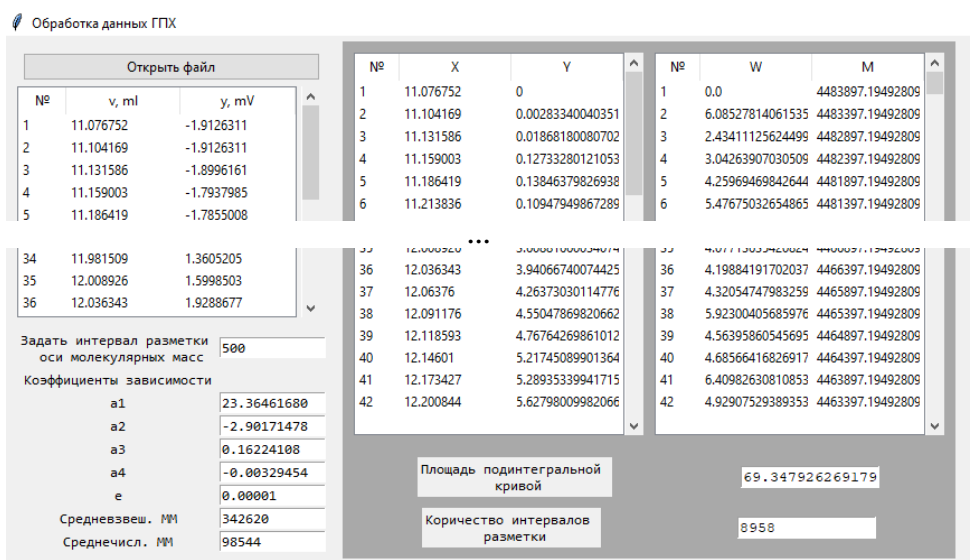
Программная реализация

По результатам проведенных теоретических и экспериментальных исследований зарегистрировано программное приложение (ПП) [25]. Скриншот экранного интерфейса ПП показан на рис. 5.

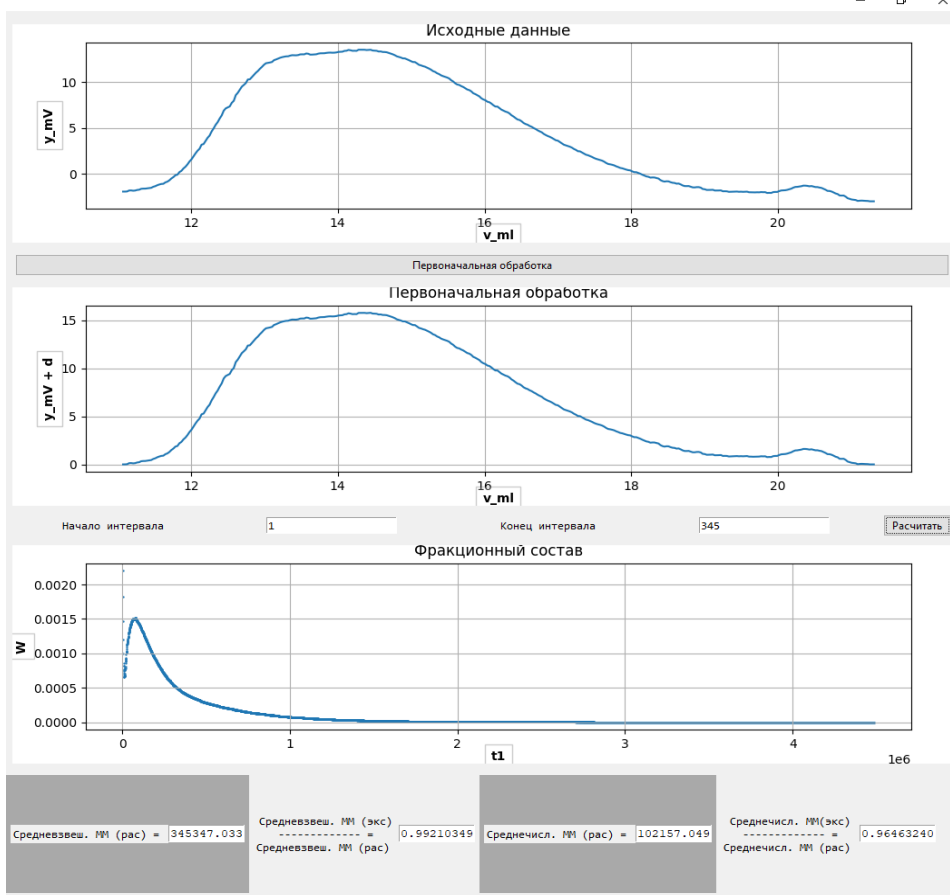
По кнопке «Открыть файл» загружаются оцифрованные данные ГПХ. После загрузки данных отображаются график экспериментальной кривой и содержание файла (табличная часть слева (см. рис. 5, а) и график «Исходные данные» (см. рис. 5, б). В левой области (см. рис. 5, а) предусмотрен ввод коэффициентов калибровочной зависимости, а также табличные значения средних молекулярных масс. По кнопке «Первоначальная обработка» проводится корректировка нулевой линии и заполняется табличная часть скорректированными данными (график «Первоначальная обработка» (см. рис. 5, б)). В правой области задается интервал разметки молекулярных масс. При нажатии на кнопку «Рассчитать» происходит расчет фракционного состава по разработанному алгоритму. В нижней части интерфейса выводится степень совпадения экспериментальных и расчетных данных (см. рис. 5, б).

Заключение

В результате проведенного исследования разработан эффективный метод обработки данных гелепроникающей хроматографии образцов синтетических каучуков промышленного назначения, а также алгоритмическое и программное обеспечение. Представлен алгоритм, позволяющий на основе первичных данных ГПХ напрямую получать оценку фракционного состава в широком диапазоне молекулярных масс по первичным данным ГПХ.



а)



б)

Рис. 5. Скриншот ПП «Получение фракционного состава полимера по результатам обработки геле-проникающей хроматографии»

Алгоритм позволяет рассчитывать фракционный состав, при условии, что задан шаг фракционирования по молекулярным массам, учитывая, что он остается постоянным на всем рассматриваемом диапазоне изменения молекулярной массы. Для выполнения алгоритма, кроме исходного графика ГПХ, в качестве начальных данных требуется информация о параметрах калибровочной зависимости и зависимости Марка–Кунна–Хаувинка. Однако не все системы ГПХ предоставляют такие данные (например, в результатах ГПХ компании Кнауер представлена неполная информация). Вариант получения оценок фракционного состава может быть связан с дальнейшими исследованиями, направленными на модернизацию представленного в работе алгоритма.

Список литературы

1. Математическое моделирование синтеза термоэластопластов с учетом реакции иницирования и влияния вязкости среды на порядок реакции / В. К. Битюков, С. Г. Тихомиров, И. А. Хаустов, М. Л. Моторин // Системы управления и информационные технологии. – 2011. – № 3.2. – С. 216 – 220.
2. Моделирование и контроль параметров качества в процессах растворной полимеризации : монография / В. К. Битюков, С. Г. Тихомиров, В. Ф. Лебедев [и др.]. – Воронеж : ВГУИТ, 2011. – 292 с.
3. Дискретное математическое описание процесса термоокислительной деградации полимеров в растворе / В. К. Битюков, С. Г. Тихомиров, И. А. Хаустов [и др.] // Каучук и резина. – 2014. – № 6. – С. 44 – 47.
4. Подвальный, С. Л. Моделирование промышленных процессов полимеризации / С. Л. Подвальный. – М. : Химия. 1979. – 350 с.
5. Подвальный, С. Л. Моделирование промышленных процессов полимеризации на основе метода моментов / С. Л. Подвальный // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2015. – Т. 11, № 1. – С. 11 – 16.
6. Барабанов, А. В. Структурное моделирование непрерывных процессов многоцентровой полимеризации / А. В. Барабанов, С. Л. Подвальный // Системы управления и информационные технологии. – 2008. – № 2.2(32). – С. 216 – 218.
7. Дорофеев, Д. В. Автоматизированная система управления технологическим процессом полимеризации бутадиен-стирольного синтетического каучука с применением математической модели контроля качественных показателей в режиме реального времени / Д. В. Дорофеев // Информационные технологии моделирования и управления. – 2009. – № 1(53). – С. 115 – 119.
8. Решение обратной кинетической задачи для процесса полимеризации бутадиена на каталитической системе $TiCl_4 - Al(i-C_4H_9)_2Cl$ / Э. Н. Абдулова, Э. Р. Гиззатова, С. И. Спивак, Ю. Б. Монаков // Вестник Башкирского университета. – 2009. – Т. 14, № 2. – С. 373 – 376.
9. Математическое моделирование процесса полимеризации бутадиена на неодимовых металлокомплексных каталитических системах / А. М. Гумеров, И. М. Давлетбаева, Т. А. Юсупов [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. – 2010. – № 9. – С. 291 – 299.
10. Математическое моделирование процесса полимеризации 1,3-бутадиена на неодимсодержащем катализаторе с учетом полицентровости и передачи цепи на полимер в реакторе периодического действия / Г. В. Мануйко, И. И. Салахов, Г. А. Аминова [и др.] // Теоретические основы химической технологии. – 2010. – Т. 44, № 2. – С. 151 – 161.
11. Подвальный, С. Л. Методы решения прямой и обратной кинетических задач в зависимости от сложности химической системы / С. Л. Подвальный, А. М. Белянин, А. В. Плотников // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, № 5. – С. 18 – 21.

12. ГОСТ Р ИСО 11344–2022. Каучуки и термоэластопласты. Определение молекулярно-массовых характеристик методом гель-проникающей хроматографии = Raw rubbers and thermoelastoplasts. Determination of the molecular-mass distribution by gel permeation chromatography. – Введ. 2023-07-01. – М. : Стандартинформ, 2022. – 24 с.

13. Беленький, Б. Г. Определение молекулярной массы, размера и разветвленности макромолекул с помощью двухдетекторной ГПХ. Использование ГПХ с рефрактометрическим детектором и многоугловым лазерным нефелометром (malls) / Б. Г. Беленький // Научное приборостроение – 2001. – Т.11, №1. – С. 3 – 14.

14. Свирский, К. Мультидетекторная гель-проникающая хроматография для анализа полимеров / К. Свирский // Аналитика. – 2013. – №5 – С. 70 – 75.

15. Клюбин, В. В. Измерение молекулярно-массового распределения полимеров методом динамического светорассеяния / В. В. Клюбин // Высокомолекулярные соединения. Серия А. – 1995. – Т. 37, № 4. – С. 670 – 675.

16. Щепелина, О. А. Использование процедуры индивидуальной калибровки для определения молекулярной массы сополимера методом гель-хроматографии / О. А. Щепелина, О. И. Кропачева // Вестник Челябинского государственного университета. – 2004. – Т.4, № 1. – С. 32 – 36.

17. Экспресс-анализ сахаров методом высокоэффективной жидкостной хроматографии / М. И. Соколов, Н. Д. Верзилина, О. Б. Рудаков [и др.] // Пищевая промышленность. – 2004. – №8. – С. 94 – 95.

18. Методические особенности определения молекулярно-массового распределения декстранов методом гель-проникающей (эксклюзионной) хроматографии в нормативной документации на лекарственные средства различных групп / Р. С. Смирнов, Е. В. Иванйен, А. И. Лутцева [и др.] // Ведомости Научного центра экспертизы средств медицинского применения. – 2017. – Т.7, № 1. – С. 3 – 8.

19. Разработка подходов к экспрессному анализу коллагеновых белков с применением метода гель-проникающей хроматографии / Е. В. Гераськина, Ю. Л. Кузнецова, Н. Б. Валетова [и др.] // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. – 2014. – № 4-1. – С. 164 – 168.

20. Боймирзаев, А. С. Стерическая эксклюзионная хроматография водорастворимых полисахаридов / А. С. Боймирзаев // Химия растительного сырья. – 2009. – № 2. – С. 19 – 28.

21. О проблеме решения обратной некорректной задачи в химической технологии полимеров: интерпретация гель-хроматограмм / Л. А. Бигаева, И. И. Латыпов, С. М. Усманов [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – Т. 18, №3. – С. 86 – 92.

22. Таганов, Н. Г. Градуировка гель-хроматографа по молекулярным массам полимера с учетом приборного уширения / Н. Г. Таганов, Г. В. Коровина, С. Г. Энтелис // Высокомолекулярные соединения. Серия А. – 1980. – Т.22, № 10. – С. 2385 – 2389.

23. Метод обработки гель-хроматограмм с учетом размывания: аппроксимационный способ решения уравнения Фредгольма первого рода / Е. Н. Кислов, Э. Г. Зотиков, Н. Г. Подосенова [и др.] // Высокомолекулярные соединения. Серия А. – 1978. – Т. 20, № 8. – С. 1910 – 1913.

24. Хаустов, И. А. Расчет фракционного состава полимера на основе данных ГПХ / И. А. Хаустов, Р. А. Романов, Р. А. Лыков // Проблемы и инновационные решения в химической технологии ПИРХТ-2022 : материалы Всероссийской конференции с международным участием. – Воронеж, 2022. – С. 490 – 493.

25. Программный комплекс «Получение фракционного состава полимера по результатам обработки данных гель-проникающей хроматографии» / И. А. Хаустов, Р. А. Романов, А. С. Дворникова // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2024680996; правообладатель ФГБОУ ВО «ВГУИТ»; заявл. 05.08.2024 ; опубли. 04.09.2024, Бюл. № 9.

A Method for Processing Primary Data of Gel Permeation Chromatography of Industrial Rubber Solutions for Automated Calculation of their Fractional Compositions

I. A. Khaustov✉, V. K. Bityukov, R. A. Romanov, A. A. Maslov, A. S. Dvornikova

Department of Information and Control Systems, khaustov_ia@mail.ru;
Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russia

Keywords: algorithm of automated data processing; gel permeation chromatography; fractional composition of polymer; mathematical modeling; synthetic rubber.

Abstract: The paper considers an algorithmic method and develops software for processing the results of gel permeation chromatography designed to obtain advanced knowledge about the fractional composition of a homogeneous polymer using the example of an analysis of a sample of synthetic rubber of the SKDT brand for industrial purposes. The polymer fraction in the work is understood as a part of the polymer from the total mass, which is characterized by the property $M_i \leq M < M_i + \Delta M$. The relevance of the development of a method for obtaining the fractional composition of a homogeneous polymer is determined by the use of the obtained data on the fractional composition to simulate the dynamics of polymerization, destruction, depolymerization, and structuring processes. The obtained data can be used as initial and current values used to identify the kinetic constants of chemical reactions. The method is based on the use of primary data in the form of a digitized chromatographic curve with known values of calibration dependencies and parameters of the Mark–Kunn–Hauvink equation.

References

1. Bityukov V.K., Tikhomirov S.G., Khaustov I. A., Motorin M.L. [Mathematical modeling of the synthesis of thermoplastic elastomers, considering the initiation reaction and the effect of the viscosity of the medium on the order of the reaction], *Sistemy upravleniya i informacionnye tekhnologii* [Control systems and information technology], 2011, no. 3.2, pp. 216-220 (In Russ., abstract in Eng.)
2. Bityukov V.K., Tikhomirov S.G., Lebedev V.F., Khvostov A.A., Khaustov I.A. *Modelirovanie i kontrol' parametrov kachestva v processah rastvornoj polimerizacii* [Modeling and control of quality parameters in the processes of solution polymerization], Voronezh: VSUET, 2011, 292 p. (In Russ.)
3. Bityukov V.K., Tikhomirov S.G., Khaustov I. A., Motorin M.L. [Discrete mathematical description of the process of thermal oxidative degradation of polymers in solution], *Kauchuk i rezina* [Rubber and rubber], 2014, no. 6, pp. 44-47 (In Russ., abstract in Eng.)
4. Podval'nyj S.L. *Modelirovanie promyshlennykh processov polimerizacii* [Modeling of industrial polymerization processes], Moscow: Himiya, 1979, 350 p. (In Russ.)
5. Podval'nyj S.L. [Modeling of industrial polymerization processes based on the method of moments], *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Voronezh state technical university], 2015, Vol. 11, no. 1, pp. 11-16 (In Russ., abstract in Eng.)
6. Barabanov A.V., Podval'nyj S.L. [Structural modeling of continuous multicenter polymerization processes], *Sistemy upravleniya i informacionnye tekhnologii* [Control

systems and information technology], 2008, no. 2.2 (32), pp. 216-218 (In Russ., abstract in Eng.)

7. Dorofeev D.V. [Automated process control system for the polymerization of styrene-butadiene synthetic rubber using a mathematical model for monitoring quality indicators in real time], *Informacionnye tekhnologii modelirovaniya i upravleniya* [Information technologies of modelling and control], 2009, no. 1 (53), pp. 115-119 (In Russ., abstract in Eng.)

8. Abdulova E.N., Gizzatova E.R., Spivak S.I., Monakov Yu.B. [Solving the inverse kinetic problem for the butadiene polymerization process on the catalyst system $\text{TiCl}_4 - \text{Al}(\text{I-C}_4\text{H}_9)_2\text{Cl}$], *Vestnik Bashkirskogo universiteta* [Bulletin of Bashkir University], 2009, vol. 14, no. 2, pp. 373-376 (In Russ., abstract in Eng.)

9. Gumerov A.M., Davletbaeva I.M., Yusupov T.A., Kalistratova V.V., Zaboristov V.N. [Mathematical modeling of butadiene polymerization process on neodymium metal complex catalytic systems], *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Herald of Kazan technological university], 2010, no. 9, pp. 291-299 (In Russ., abstract in Eng.)

10. Manujko G.V., Salahov I.I., Aminova G.A., Ahmetov I.G., D'yakonov G.S., Bronskaya V.V., Demidova E.V. [Mathematical modeling of 1,3-butadiene polymerization over a neodymium-based catalyst in a batch reactor with account taken of the multisite nature of the catalyst and chain transfer to the polymer], *Teoreticheskie osnovy himicheskoy tekhnologii* [Theoretical foundations of chemical engineering], 2010, vol. 44, no. 2, pp. 151-161 (In Russ., abstract in Eng.)

11. Podval'nyj C.L., Belyanin A.M., Plotnikov A.V. [Methods for solving direct and inverse kinetic problems depending on the complexity of the chemical system], *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Voronezh state technical university], 2012, vol. 8, no. 5, pp. 18-21 (In Russ., abstract in Eng.)

12. GOST R ISO 11344–2022. *Kauchuki i termoelastoplasty. Opredelenie molekulyarno-massovykh harakteristik metodom gel'-pronikayushchej hromatografii* [Raw rubbers and thermoelastoplasts. Determination of the molecular-mass distribution by gel permeation chromatography]. Moscow: Standartinform, 2022, 24 p. (In Russ.)

13. Belenkii B.G. [Determination of molecular mass, size and branching by double-detector GPC. Using GPC with a refractometric detector and multiangle laser nephelometer (MALLS)], *Nauchnoe priborostroenie* [Scientific instrumentation], 2001, Vol. 11, no. 1, pp. 3-14 (In Russ., abstract in Eng.)

14. Svirskij K. [Multi-detector gel permeation chromatography for polymer analysis], *Analitika* [Analytics], 2013, no. 5, pp. 70-75 (In Russ., abstract in Eng.)

15. Klyubin V.V. [Determination of the molecular mass distribution of polymers by method of dynamic light scattering], *Vysokomolekulyarnye soedineniya* [Polymer Science], 1995, Series A, vol. 37, no. 4, pp. 670-675 (In Russ., abstract in Eng.)

16. Shchepelina O.A., Kropacheva O.I. [Using an individual calibration procedure to determine the molecular weight of a copolymer by gel chromatography], *Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Chelyabinsk State University], 2004, vol. 4, no. 1, pp. 32-36 (In Russ., abstract in Eng.)

17. Sokolov M.I., Verzilina N.D., Rudakov O.B., Tolokonnikov V.I., Nikul'shin A.P., Polyanskij K.K. [Rapid analysis of sugars by high performance liquid chromatography], *Pishchevaya promyshlennost'* [Food industry], 2004, no. 8, pp. 94-95 (In Russ., abstract in Eng.)

18. Smirnov R.S., Ivanajnen E.V., Lutceva A.I., Vaganova O.A., Orlov D.A. [Methodological aspects of determining molecular mass distribution of dextrans by size-exclusion chromatography for various groups of medicines], *Vedomosti Nauchnogo centra ekspertizy sredstv medicinskogo primeneniya* [The bulletin of the scientific

centre for expert evaluation of medicinal products], 2017, vol. 7, no. 1, pp. 3-8 (In Russ., abstract in Eng.)

19. Geraskina E.V., Kuznecova Yu.L., Valetova N.B., Tarankova O.A., Matkivskaya Yu.O., Chukhmanov E.P., Astanina M.V., Semenycheva L.L. [Development of approaches to express analysis of the collagen proteins using the methods of size exclusion chromatography], *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo* [Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod], 2014, no. 4-1, pp. 164-168 (In Russ., abstract in Eng.)

20. Bojmirzaev A.S. [Steric exclusive chromatography of water-soluble polysaccharides], *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* [Chemistry of plant raw material], 2009, no. 2, pp. 19-28 (In Russ., abstract in Eng.)

21. Bigaeva L.A., Latypov I.I., Usmanov S.M., Nabiullin A.R., Shiyani D.A., Ulitin N.V. [On the problem of solving the inverse incorrect task in the chemical technology of polymers: interpretation of gel chromatograms], *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Herald of Kazan technological university], 2015, vol. 18, no. 3, pp. 86-92 (In Russ., abstract in Eng.)

22. Taganov N.G., Korovina G.V., Entelis S.G. [Calibration of gel chromatograph by molecular weight of polymer taking into account instrument broadening], *Vysokomolekulyarnye soedineniya* [Polymer Science], 1980, Series A, vol. 22, no. 10, pp. 2385-2389 (In Russ., abstract in Eng.)

23. Kislov E.N., Zotikov E.G., Podosenova N.G., Ponomareva E.L., Budtov V.P. [Method for processing gel chromatograms taking into account erosion: approximation method for solving the Fredholm equation of the first kind], *Vysokomolekulyarnye soedineniya* [Polymer Science], 1978, Series A, vol. 20, no. 8, pp. 1910-1913 (In Russ., abstract in Eng.)

24. Khaustov I.A., Romanov R.A., Lykov R.A. *Problemy i innovacionnye resheniya v himicheskoy tekhnologii PIRHT-2022: materialy vserossijskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem* [Problems and innovative solutions in chemical technology PIRHT-2022: Proceedings of the All-Russian conference with international participation], Voronezh: VSUET, 2022, pp. 490-493 (In Russ., abstract in Eng.)

25. Khaustov I.A., Romanov R.A., Dvornikova A.S. [Software package "Obtaining the fractional composition of a polymer based on the results of processing gel permeation chromatography data"], Russian Federation, 2024, Certificate of registration of the computer program No. 2024680996 (In Russ.)

Methode der Primärdatenverarbeitung der gelpenetranter Chromatographie der Gummilösungen für industrielle Zwecke zur automatisierten Berechnung ihrer fraktionellen Zusammensetzungen

Zusammenfassung: Es ist eine algorithmische Methode betrachtet und eine Software zur Verarbeitung der Ergebnisse der gelpenetranter Chromatographie entwickelt, um am Beispiel der Analyse einer Probe von synthetischem Kautschuk der Marke SKDT für den industriellen Einsatz erweiterte Erkenntnisse über die fraktionierte Zusammensetzung des homogenen Polymers zu gewinnen. Unter dem Polymeranteil wird in dieser Arbeit ein Teil des Polymers aus der Gesamtmasse verstanden, der durch die Eigenschaft $M_i \leq M < M_i + \Delta M$ gekennzeichnet ist. Die Relevanz der Entwicklung der Methode zur Ermittlung der fraktionellen Zusammensetzung eines homogenen Polymers wird durch die Anwendung der erhaltenen Daten über die fraktionelle Zusammensetzung zur Modellierung der Dynamik der Prozesse der Polymerisation, des Abbaus, der Depolymerisation und der Strukturierung bestimmt.

Die gewonnenen Daten können als Anfangs- und aktuelle Werte zur Ermittlung der kinetischen Konstanten chemischer Reaktionen verwendet werden. Die Methode basiert auf der Verwendung von Primärdaten in Form einer digitalen chromatographischen Kurve mit bekannten Werten von Kalibrierungsabhängigkeiten und Parametern der Mark–Kunn–Houwink-Gleichung.

Procédé de traitement des données primaires de chromatographie par gel-pénétration des solutions de caoutchoucs industriels pour le calcul automatisé de leurs compositions fractionnaires

Résumé: Est examinée la méthode algorithmique. Est élaboré le logiciel pour traiter les résultats de la chromatographie pénétrante de gel, destiné à acquérir des connaissances avancées sur la composition fractionnée d'un polymère homogène à l'exemple de l'analyse d'un échantillon de caoutchouc synthétique de la marque SKDT à usage industriel. Sous la fraction de polymère dans l'article, on entend une partie du polymère de la masse totale, qui est caractérisée par la propriété $M_i \leq M < M_i + \Delta M$. La pertinence du développement d'une méthode pour obtenir la composition fractionnée d'un polymère homogène est due à l'utilisation des données obtenues sur la composition fractionnée pour modéliser la dynamique des processus de polymérisation, de destruction, de dépolymérisation, de structuration. Les données obtenues peuvent être utilisées comme valeurs initiales et actuelles utilisées pour identifier les constantes cinétiques des réactions chimiques. La méthode est basée sur l'utilisation de données primaires sous la forme d'une courbe chromatographique numérisée à des valeurs connues des dépendances d'étalonnage et des paramètres de l'équation de Mark–Kunn–Hauwink.

Авторы: *Хаустов Игорь Анатольевич* – доктор технических наук, заведующий кафедрой информационных и управляющих систем; *Битюков Виталий Ксенофонтович* – доктор технических наук, профессор кафедры информационных и управляющих систем; *Маслов Александр Александрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры информационных и управляющих систем; *Романов Роман Александрович* – старший преподаватель кафедры информационных и управляющих систем; *Дворникова Анна Сергеевна* – магистрант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», Воронеж, Россия.

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ И УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВОЙ РАДИОНАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПОСАДКИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

А. В. Иванов✉, С. П. Москвитин, А. А. Иванов, Н. А. Лежнева

*Кафедра «Радиотехника», alexsandr-ivanov68@yandex.ru;
ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: аномальные измерения; местоположение объекта; определение координат; спутниковая радионавигационная система.

Аннотация: Методами марковской теории оценивания случайных процессов проведен синтез оптимальных алгоритмов для информационно-измерительной и управляющей системы на основе спутниковой радионавигационной системы для решения задач посадки летательных аппаратов. Для обеспечения контроля целостности навигационных данных синтезированы три независимых канала обработки выходных сигналов спутниковой радионавигационной системы, радиовысотомера, барометрического высотомера и инерциальной навигационной системы. Разработана структурная схема обработки информации в информационно-измерительной и управляющей системе с контролем целостности истинной высоты полета летательного аппарата.

Введение

Важным этапом полета летательного аппарата (ЛА) является заход на посадку и посадка. При заходе на посадку с применением посадочной системы ЛА должен быть с допустимой вероятностью выведен в некоторую область пространства, положение и размеры которой зависят от посадочного метеоминимума. Данная область представляет собой пространство допустимых отклонений ЛА от заданной посадочной траектории, попадание в которое гарантирует, при условии нахождения скорости в установленных пределах, что ЛА выполнит необходимый корректирующий маневр и приземлится в заданной точке взлетно-посадочной полосы. Границы этой области определяются допустимыми боковыми отклонениями в горизонтальной области и отклонениями по высоте от заданной траектории посадки, которые зависят от расстояния до точки приземления. При решении задач захода на посадку и посадки навигационно-посадочный комплекс должен обеспечивать высокую точность определения места и истинной высоты полета ЛА. Требования к точности определения места и высоты при заходе на посадку и посадке самолетов по категориям ИКАО (Международная организация гражданской авиации) приведены в табл. 1 [1].

Кроме точности навигационного обеспечения важным является его целостность. Под целостностью системы навигационного обеспечения понимается возможность своевременно обнаруживать аномальную работу ее элементов и защищать результат решения навигационной задачи от влияния этих аномалий.

Таблица 1

Требования к точности определения места и высоты при заходе на посадку и посадке самолетов по категориям ICAO

Категория посадки	Высота над взлетно-посадочной полосой (дальность до точки приземления), м	Требования к погрешности (СКО), м	
		боковая	вертикальная
1	30,0 (716)	4,5...8,5	1,5...2,0
2	15,0 (358)	2,3...2,6	0,7...0,85
3	2,4 (57)	2,0	0,2...0,3

Наиболее жесткие требования по целостности предъявляются к системе при заходе и посадке по 1, 2 и 3-й категориям ICAO, которые составляют, соответственно, 0,999999, 0,999999 и 0,9999999995 при допустимом времени предупреждения не более 1 с [1].

Для решения задач захода на посадку и посадки летательного аппарата широкое распространение получили информационно-измерительные и управляющие системы – навигационно-посадочные комплексы (НПК). В состав навигационно-посадочных комплексов включают аппаратуру приема сигналов спутниковых радионавигационных систем (СРНС), радиовысотомер (РВ), барометрический высотомер (БВ) и инерциальную навигационную систему (ИНС) [2].

Для создания алгоритмического обеспечения навигационно-посадочного комплекса широко используются методы марковской теории оптимального оценивания случайных процессов [3 – 5], позволяющие создать комплексные оптимальные алгоритмы обработки информации. Выполнение требований ИКАО по точности в навигационно-посадочных комплексах обеспечивается за счет наличия в их составе радиотехнических измерителей СРНС и РВ. В то же время использование СРНС и РВ приводит к ряду проблем:

- появление на выходе СРНС недостоверных данных, что связано с возникновением аномальных измерений в режиме слежения на выходе следящей системы за задержкой до навигационного космического аппарата (НКА) в аппаратуре приема сигналов СРНС или с передачей потребителю недостоверных данных о координатах местоположения НКА [6];
- кратковременное пропадание сигнала на выходе аппаратуры приема сигналов СРНС, что обусловлено влиянием канала распространения на радиосигнал, затенением приемной антенны, возникновением многолучевости распространения радиосигнала;
- кратковременное пропадание сигнала на выходе РВ в случаях захода на посадку со стороны моря или в зимнее время при наличии снежного покрова и льда;
- полное пропадание сигнала на выходе аппаратуры приема сигналов СРНС или на выходе РВ в случаях отказа аппаратуры.

Указанные проблемы приводят к появлению ошибок определения истинной высоты полета ЛА на выходе навигационно-посадочного комплекса, что является опасным при категоризируемом заходе на посадку и посадке ЛА. Для целостности навигационного обеспечения в работах [7, 8] разработаны НПК, в которых проводится определение наличия или отсутствия радиосигнала на входе аппаратуры приема СРНС, что позволяет при отсутствии радиосигнала СРНС исключать его из дальнейшей обработки. В исследовании [9] разработан НПК, в котором оценивается мощность радиосигнала на входе аппаратуры приема СРНС для принятия решения о его дальнейшем использовании.

В данной работе в целях обеспечения целостности навигационных данных на выходе навигационно-посадочного комплекса предлагается за счет избыточности информации создать три независимых канала обработки информации и разработать схему контроля целостности.

Цель работы – методами марковской теории оптимального оценивания случайных процессов синтезировать алгоритмы обработки информации и разработать структурную схему навигационно-посадочного комплекса, в котором проводится контроль целостности истинной высоты полета ЛА.

Постановка задачи

Координаты местоположения и параметры движения ЛА в вертикальной плоскости (вертикальный канал) будем определять в нормальной земной системе координат $OX_g Y_g Z_g$, у которой ось OX_g направлена на Север, OY_g – на Восток, OZ_g – вверх по местной вертикали.

Инерциальная навигационная система представляет собой стабилизируемую в горизонтальной плоскости свободную в азимуте платформу. Начало инерциальной системы координат $OX_{и} Y_{и} Z_{и}$ совпадает с центром масс ЛА. Начальная выставка осуществлена, ось $OX_{и}$ направлена на Север, оси $OY_{и}$ – на Восток и $OZ_{и}$ – вверх по местной вертикали. Выходные сигналы ИНС дискретизированы по времени. С учетом вышесказанного, сигнал на выходе ИНС в вертикальной плоскости по оси $OZ_{и}$ можно записать в виде [10]

$$a_Z^{\text{ИНС}}(t_{k+1}) = a_Z(t_{k+1}) + \Delta_{aZ}(t_{k+1}) + g + \sigma_a(2T/\alpha_a)^{0,5} n_{aZ}(t_{k+1}), \quad (1)$$

где $a_Z^{\text{ИНС}}(t_{k+1})$ и $a(t_{k+1})$ – измеренные и истинные значения составляющей вектора ускорения ЛА по оси $OZ_{и}$ соответственно; g – ускорение свободного падения; α_a и σ_a^2 – коэффициент, характеризующий ширину спектра погрешности, и дисперсия флуктуационной погрешности соответственно; $t_{k+1} - t_k = T$ – интервал дискретизации; $n_{aZ}(t_{k+1})$ – независимые выборки гауссовского процесса с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией; $\Delta_{aZ}(t_{k+1})$ – постоянная составляющая погрешности измерения ускорения

$$\Delta_{aZ}(t_{k+1}) = \Delta_{aZ}(t_k). \quad (2)$$

При решении задач захода на посадку и, особенно, что наиболее важно при посадке, можно полагать, что относительная высота совпадает с истинной высотой полета ЛА. Поэтому полагаем, что измерение высоты при помощи БВ осуществляется относительно давления на уровне $(R_0 + h_{\text{аэр}})$, где R_0 – известный радиус-вектор геоцентрической (сферической) системы координат, $h_{\text{аэр}}$ – высота рельефа местности в точке аэродрома. Тогда при условии, что систематическая ошибка учтена при выставке БВ, сигнал на выходе БВ $H_{\text{отн}}^{\text{БВ}}(t_{k+1})$ в дискретные моменты времени будет иметь вид [3]

$$H_{\text{отн}}^{\text{БВ}}(t_{k+1}) = H_{\text{ист}}(t_{k+1}) + \Delta H(t_{k+1}) + u_{\text{БВ}}(t_{k+1}), \quad (3)$$

где $H_{\text{ист}}(t_{k+1})$ – значение истинной высоты; $\Delta H(t_{k+1})$ и $u_{\text{БВ}}(t_{k+1})$ – соответственно постоянная ошибка и флуктуационная погрешность, описываемые выражениями:

$$\Delta H(t_{k+1}) = \Delta H(t_k);$$

$$u_{\text{БВ}}(t_{k+1}) = \varphi_{\text{ин}}(t_{k+1}, t_k) u_{\text{БВ}}(t_k) + \gamma_{\text{и}}(t_{k+1}, t_k) n_{\text{и}}(t_k), \quad u_{\text{БВ}}(t_0) = u_{\text{БВ}0}, \quad (4)$$

в которых

$$\varphi_{\text{ин}}(t_{k+1}, t_k) = \exp(-\gamma_{\text{БВ}} T); \quad \gamma_{\text{и}}(t_{k+1}, t_k) = \sigma_{\text{БВ}} [1 - \varphi_{\text{ин}}^2(t_{k+1}, t_k)]^{0,5}; \quad (5)$$

$\gamma_{\text{БВ}}$ и $\sigma_{\text{БВ}}^2$ – коэффициент, характеризующий ширину спектра погрешности, и дисперсия флуктуационной погрешности соответственно; $n_{\text{и}}(t_k)$ – независимые выборки гауссовского процесса с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией.

Аппаратура приема сигналов СРНС обеспечивает прием радиосигналов СРНС ГЛОНАСС. Считаем, что преобразование выходных данных о местоположении ЛА из системы координат ПЗ-90, в которой работает СРНС ГЛОНАСС, в нормальную земную систему координат выполнено. В этом случае измеренное значение высоты ЛА относительно центра Земли $H^{\text{СРНС}}(t_{k+1})$ на выходе аппаратуры приема в дискретные моменты времени t_{k+1} , $k = 0, 1, 2, \dots$, аналогично [11] представим в виде

$$H^{\text{СРНС}}(t_{k+1}) = H_{\text{ист}}(t_{k+1}) + (R_0 + h_{\text{аэр}}) + \sigma_z n_z(t_{k+1}), \quad (6)$$

где $n_z(t_{k+1})$ – независимые выборки гауссовского случайного процесса с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией; σ_z – среднеквадратическая ошибка измерения высоты ЛА.

Радиовысотомер проводит измерение истинной высоты полета ЛА. Измеренное значение истинной высоты ЛА $H^{\text{РВ}}(t_{k+1})$ на выходе радиовысотомера в дискретные моменты времени t_{k+1} , $k = 0, 1, 2, \dots$, аналогично [3] представим в виде

$$H^{\text{РВ}}(t_{k+1}) = H_{\text{ист}}(t_{k+1}) + \sigma_{\text{РВ}} n_{\text{РВ}}(t_{k+1}), \quad (7)$$

где $n_{\text{РВ}}(t_{k+1})$ – независимые выборки гауссовского случайного процесса с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией; $\sigma_{\text{РВ}}$ – среднеквадратическая ошибка измерения высоты ЛА.

Задание математической модели изменения положения объекта в вертикальной плоскости предполагает описание изменения его положения во времени. Зададим это системой дифференциальных уравнений вида:

$$\frac{dH_{\text{отн}}(t)}{dt} = V_Z(t); \quad \frac{dV_Z(t)}{dt} = a_Z(t). \quad (8)$$

Для задания модели изменения во времени ускорения ЛА в вертикальной плоскости применяют принцип распределения информации [3] между векторами наблюдения и управления. Согласно этому принципу значение составляющей ускорения объекта $a_Z(t)$ в математической модели (8) заменим на измеренное ИНС, то есть выходной сигнал ИНС $a_Z^{\text{ИНС}}(t_k)$ используем в качестве компоненты вектора управления. В результате для дискретных моментов времени получим:

$$H_{\text{отн}}(t_{k+1}) = H_{\text{отн}}(t_k) + TV_Z(t_k) + 0,5T^2 a_Z^{\text{ИНС}}(t_k) - 0,5T^2 \Delta_{aZ}(t_k) - \\ - 0,5T^2 g - 0,5T^2 \sigma_a (2T / \alpha_a)^{0,5} n_{aZ}(t_k); \quad (9)$$

$$V_Z(t_{k+1}) = V_Z(t_k) + Ta_Z^{\text{ИНС}}(t_k) - T\Delta_{aZ}(t_k) - Tg - T\sigma_a (2T / \alpha_a)^{0,5} n_{aZ}(t_k). \quad (10)$$

Подлежащий оцениванию вектор состояния в вертикальной плоскости, характеризующий положение объекта и скорость изменения этого положения во времени, включает четыре компоненты $\mathbf{X}(t_k) = [H_{\text{отн}}(t_k), V_Z(t_k), \Delta H(t_k), \Delta_{aZ}(t_k)]^T$ и в соответствии с (2), (4), (9), (10) описывается разностным векторно-матричным стохастическим уравнением

$$\mathbf{X}(t_{k+1}) = \Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{X}_B(t_k) + \Psi(t_{k+1}, t_k) \mathbf{W}_B(t_k) + \Gamma_x(t_{k+1}, t_k) N_x(t_k), \quad (11)$$

где $\mathbf{W} = [a_Z^{\text{ИНС}}, g]^T$ – известный вектор управления; $N_x(t_k) = n_{aZ}(t_k)$ – формирующие стандартные гауссовские случайные величины; Φ_{xx} – фундаментальная матрица размером (4×4) с ненулевыми элементами $\phi_{xx11} = \phi_{xx22} = \phi_{xx33} = \phi_{xx44} = 1$, $\phi_{xx12} = T$, $\phi_{xx14} = -0,5T^2$, $\phi_{xx24} = -T$; Ψ – переходная матрица управления размером (4×2) с ненулевыми элементами $\psi_{11} = 0,5T^2$, $\psi_{12} = -0,5T^2$, $\psi_{13} = T$, $\psi_{22} = -T$; и Γ_x – переходной вектор возмущения размером (4×1) с ненулевыми элементами, $\gamma_{x11} = -0,5T^2 \sigma_a (2T / \alpha_a)^{0,5}$, $\gamma_{x21} = -T \sigma_a (2T / \alpha_a)^{0,5}$.

Вектор наблюдения $\Xi_B(t_{k+1}) = [\xi_1(t_{k+1}), \xi_2(t_{k+1}), \xi_3(t_{k+1})]^T$ включает наблюдения на выходе БВ $\xi_1(t_{k+1}) = H_{\text{отн}}^{\text{БВ}}(t_{k+1})$, аппаратуры приема сигналов СРНС $\xi_2(t_{k+1}) = H^{\text{СРНС}}(t_{k+1})$ и радиовысотомера $\xi_3(t_{k+1}) = H^{\text{РВ}}(t_{k+1})$, которые в дискретные моменты времени t_{k+1} , $k = 0, 1, 2, \dots$, в соответствии с (3), (6), (7) описываются выражениями:

$$\xi_1(t_{k+1}) = \mathbf{H}_1(t_{k+1}) \mathbf{X}(t_{k+1}) + u_{\text{БВ}}(t_{k+1}); \quad (12)$$

$$\xi_2(t_{k+1}) = \mathbf{H}_2(t_{k+1}) \mathbf{X}(t_{k+1}) + V_2 + \Gamma_2(t_{k+1}) N_2(t_{k+1}); \quad (13)$$

$$\xi_3(t_{k+1}) = \mathbf{H}_3(t_{k+1}) \mathbf{X}(t_{k+1}) + \Gamma_3(t_{k+1}) N_3(t_{k+1}), \quad (14)$$

где $\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2, \mathbf{H}_3$ – векторы наблюдения размером (1×4) с ненулевыми элементами $h_{11} = h_{13} = 1$, $h_{21} = 1$, $h_{31} = 1$; $V_2 = R_0 + h_{\text{аэр}}$ – известная величина; $\Gamma_2 = \sigma_z$; $N_2(t_{k+1}) = n_z(t_{k+1})$ – шум наблюдения сигнала СРНС; $\Gamma_3 = \sigma_{\text{РВ}}$; $N_3(t_{k+1}) = n_{\text{РВ}}(t_{k+1})$ – шум наблюдения сигнала РВ.

Комплексные оптимальные алгоритмы обработки информации в информационно-измерительной и управляющей системе – НПК ЛА с контролем целостности

Для получения алгоритмов комплексной оптимальной обработки информации в навигационно-посадочном комплексе с возможностью контроля целостности, выдаваемой комплексом истинной высоты полета ЛА, используем методы марковской теории оптимального оценивания. Применяя данные методы, синтезируем в нави-

гационно-посадочном комплексе оптимальные алгоритмы обработки информации для трех каналов, а именно каналы обработки выходных сигналов: СРНС, БВ и ИНС; РВ, БВ и ИНС; БВ и ИНС.

Алгоритмы обработки информации в навигационно-посадочном комплексе по сигналам СРНС, БВ и ИНС

Подлежащий оцениванию вектор состояния $\mathbf{X}(t_{k+1})$ включает четыре компоненты и описывается разностным векторно-матричным стохастическим уравнением (11). Вектор наблюдения $\Xi(t_{k+1}) = [\xi_1(t_{k+1}), \xi_2(t_{k+1})]^T$ включает наблюдения на выходе БВ $\xi_1(t_{k+1}) = H_{\text{отн}}^{\text{БВ}}(t_{k+1})$ и аппаратуры приема сигналов СРНС $\xi_2(t_{k+1}) = H^{\text{СРНС}}(t_{k+1})$, которые в дискретные моменты времени t_{k+1} , $k = 0, 1, 2, \dots$, описываются выражениями (12), (13).

Оценка вектора состояния $\mathbf{X}^*(t_{k+1})$, полученная методами марковской теории оптимального оценивания по критерию минимума апостериорной дисперсии ошибки оценивания, будет определяться выражением [3, 4]

$$\begin{aligned} \mathbf{X}^*(t_{k+1}) = & \Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{X}^*(t_k) + \Psi(t_{k+1}, t_k) \mathbf{W}(t_k) + \mathbf{K}_1(t_{k+1}) [\xi_1(t_{k+1}) - \varphi_{uu}(t_{k+1}, t_k) \xi_1(t_k) - \\ & - \mathbf{H}_1(t_{k+1}) \Psi(t_{k+1}, t_k) \mathbf{W}(t_k) + \varphi_{uu}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{H}_1(t_k) \mathbf{X}^*(t_k) - \mathbf{H}_1(t_{k+1}) \Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{X}^*(t_k)] + \\ & + \mathbf{K}_2(t_{k+1}) [\xi_2(t_{k+1}) - \mathbf{H}_2(t_{k+1}) \Psi(t_{k+1}, t_k) \mathbf{W}(t_k) - V - \mathbf{H}_2(t_{k+1}) \Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{X}^*(t_k)], \end{aligned} \quad (15)$$

где $\mathbf{K}_1(t_{k+1})$ и $\mathbf{K}_2(t_{k+1})$ – вектор-столбцы размером (4×1) матрицы оптимальных коэффициентов передачи, которую можно представить в виде

$$\mathbf{K}(t_{k+1}) = [\mathbf{K}_1(t_{k+1}); \mathbf{K}_2(t_{k+1})].$$

Матрица оптимальных коэффициентов передачи определяется соотношениями:

$$\mathbf{K}(t_{k+1}) = [\Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{P}(t_k) \Phi_{yx}^T(t_{k+1}, t_k) + \mathbf{B}_{xy}] [\mathbf{B}_{yy} + \Phi_{yx}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{P}(t_k) \Phi_{yx}^T(t_{k+1}, t_k)]^{-1}; \quad (16)$$

$$\mathbf{P}(t_{k+1}) = [\Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{P}(t_k) \Phi_{xx}^T(t_{k+1}, t_k) + \mathbf{B}_{xx}] - \mathbf{K}(t_{k+1}) [\mathbf{B}_{xy} + \Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{P}(t_k) \Phi_{yx}^T(t_{k+1}, t_k)]^T, \quad (17)$$

в которых $\mathbf{P}(t_{k+1})$ – матрица вторых центральных моментов (ковариаций) ошибок оценивания размером (4×4) ; $\Phi_{yx}(t_{k+1}, t_k)$, $\mathbf{B}_{yx}$, $\mathbf{B}_{yy}$ – блочные матрицы, имеющие вид:

$$\Phi_{yx}(t_{k+1}, t_k) = \left[\frac{\mathbf{H}_1(t_{k+1}) \Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k) - \varphi_{uu}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{H}_1(t_k)}{\mathbf{H}_2(t_{k+1}) \Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k)} \right];$$

$$\mathbf{B}_{xy} = [\Gamma_x(t_{k+1}, t_k) \Gamma_x^T(t_{k+1}, t_k) \mathbf{H}_1^T(t_{k+1}) | \Gamma_x(t_{k+1}, t_k) \Gamma_x^T(t_{k+1}, t_k) \mathbf{H}_2^T(t_{k+1})];$$

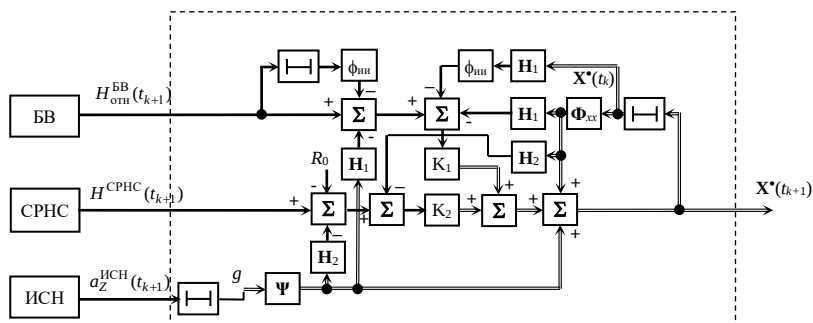


Рис. 1. Структурная схема канала обработки информации в информационно-измерительной и управляющей системе – НПК по сигналам СРНС, ИНС и БВ

$$\mathbf{B}_{yy} = \begin{bmatrix} A & C \\ B & D \end{bmatrix};$$

$$A = \mathbf{H}_1(t_{k+1})\Gamma_x(t_{k+1}, t_k)\Gamma_x^T(t_{k+1}, t_k)\mathbf{H}_1^T(t_{k+1}) - \varphi_{ин}^2(t_{k+1}, t_k);$$

$$B = \mathbf{H}_2(t_{k+1})\Gamma_x(t_{k+1}, t_k)\Gamma_x^T(t_{k+1}, t_k)\mathbf{H}_1^T(t_{k+1});$$

$$C = \mathbf{H}_1(t_{k+1})\Gamma_x(t_{k+1}, t_k)\Gamma_x^T(t_{k+1}, t_k)\mathbf{H}_2^T(t_{k+1});$$

$$D = \mathbf{H}_2(t_{k+1})\Gamma_x(t_{k+1}, t_k)\Gamma_x^T(t_{k+1}, t_k)\mathbf{H}_2^T(t_{k+1}) + \Gamma_2^2(t_k).$$

Уравнение (15) определяет структуру канала оптимальной обработки выходных сигналов СРНС, БВ и ИНС, а уравнения (16) и (17) определяют параметры устройства, в котором происходит обработка информации. Структурная схема канала обработки информации в информационно-измерительной и управляющей системе – навигационно-посадочном комплексе по сигналам СРНС, ИНС и БВ, разработанная на основе алгоритма (15), представлена на рис. 1.

В состав структурной схемы обработки информации входят сумматоры, усилители и линии задержки. Входными сигналами для схемы служат выходные сигналы СРНС, БВ и ИНС. Выходной сигнал ИНС используется в качестве вектора управления.

Алгоритмы обработки информации в навигационно-посадочном комплексе по сигналам РВ, БВ и ИНС

Подлежащий оцениванию вектор состояния $\mathbf{X}(t_{k+1})$ включает четыре компоненты и описывается разностным векторно-матричным стохастическим уравнением (11). Вектор наблюдения $\Xi(t_{k+1}) = [\xi_1(t_{k+1}), \xi_3(t_{k+1})]^T$, включает наблюдения на выходе БВ $\xi_1(t_{k+1}) = H_{отп}^{БВ}(t_{k+1})$ и РВ $\xi_3(t_{k+1}) = H_{РВ}(t_{k+1})$, которые в дискретные моменты времени $t_{k+1}, k = 0, 1, 2, \dots$, описываются выражениями (12), (14).

Оценка вектора состояния $\mathbf{X}^*(t_{k+1})$, полученная методами марковской теории оптимального оценивания по критерию минимума апостериорной дисперсии ошибки оценивания, определяется выражением [3, 4]

$$\begin{aligned} \mathbf{X}^*(t_{k+1}) = & \Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{X}^*(t_k) + \Psi(t_{k+1}, t_k) \mathbf{W}(t_k) + \mathbf{K}_1(t_{k+1}) [\xi_1(t_{k+1}) - \varphi_{uu}(t_{k+1}, t_k) \xi_1(t_k) - \\ & - \mathbf{H}_1(t_{k+1}) \Psi(t_{k+1}, t_k) \mathbf{W}(t_k) + \varphi_{uu}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{H}_1(t_k) \mathbf{X}^*(t_k) - \mathbf{H}_1(t_{k+1}) \Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{X}^*(t_k)] + \\ & + \mathbf{K}_2(t_{k+1}) [\xi_3(t_{k+1}) - \mathbf{H}_3(t_{k+1}) \Psi(t_{k+1}, t_k) \mathbf{W}(t_k) - \mathbf{H}_3(t_{k+1}) \Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{X}^*(t_k)], \quad (18) \end{aligned}$$

где $\mathbf{K}_1(t_{k+1})$ и $\mathbf{K}_2(t_{k+1})$ – вектор-столбцы размером (4×1) матрицы оптимальных коэффициентов передачи, которую можно представить в виде

$$\mathbf{K}(t_{k+1}) = [\mathbf{K}_1(t_{k+1}); \mathbf{K}_2(t_{k+1})].$$

Матрица оптимальных коэффициентов передачи определяется соотношениями (16), (17), в которых $\mathbf{P}(t_{k+1})$ – матрица вторых центральных моментов (ковариаций) ошибок оценивания размером (4×4) ; $\Phi_{yx}(t_{k+1}, t_k)$, $\mathbf{B}_{xy}$, $\mathbf{B}_{yy}$ – блочные матрицы:

$$\Phi_{yx}(t_{k+1}, t_k) = \left[\frac{\mathbf{H}_1(t_{k+1}) \Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k) - \varphi_{ui}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{H}_1(t_k)}{\mathbf{H}_3(t_{k+1}) \Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k)} \right];$$

$$\mathbf{B}_{xy} = [\Gamma_x(t_{k+1}, t_k) \Gamma_x^T(t_{k+1}, t_k) \mathbf{H}_1^T(t_{k+1}) | \Gamma_x(t_{k+1}, t_k) \Gamma_x^T(t_{k+1}, t_k) \mathbf{H}_3^T(t_{k+1})];$$

$$\mathbf{B}_{yy} = \left[\begin{array}{c|c} E & G \\ \hline F & H \end{array} \right];$$

$$E = \mathbf{H}_1(t_{k+1}) \Gamma_x(t_{k+1}, t_k) \Gamma_x^T(t_{k+1}, t_k) \mathbf{H}_1^T(t_{k+1}) - \varphi_{ui}^2(t_{k+1}, t_k);$$

$$F = \mathbf{H}_3(t_{k+1}) \Gamma_x(t_{k+1}, t_k) \Gamma_x^T(t_{k+1}, t_k) \mathbf{H}_1^T(t_{k+1});$$

$$G = \mathbf{H}_1(t_{k+1}) \Gamma_x(t_{k+1}, t_k) \Gamma_x^T(t_{k+1}, t_k) \mathbf{H}_3^T(t_{k+1});$$

$$H = \mathbf{H}_3(t_{k+1}) \Gamma_x(t_{k+1}, t_k) \Gamma_x^T(t_{k+1}, t_k) \mathbf{H}_3^T(t_{k+1}) + \Gamma_3^2(t_k).$$

Уравнение (18) определяет структуру канала оптимальной обработки выходных сигналов РВ, БВ и ИНС. Структурная схема канала обработки информации в информационно-измерительной и управляющей системе – навигационно-посадочном комплексе по сигналам РВ, ИНС и БВ, разработанная на основе алгоритма (18), представлена на рис. 2.

В состав структурной схемы обработки информации входят сумматоры, усилители и линии задержки. Входными сигналами для схемы служат выходные сигналы РВ и БВ. Выходной сигнал ИНС используется в качестве вектора управления.

Алгоритмы обработки информации в навигационно-посадочном комплексе по сигналам БВ и ИНС

Подлежащий оцениванию вектор состояния $\mathbf{X}(t_{k+1})$ включает четыре компоненты и описывается разностным векторно-матричным стохастическим уравнением (11). Вектор наблюдения включает наблюдение на выходе БВ $\xi_1(t_{k+1}) = H_{\text{отн}}^{\text{БВ}}(t_{k+1})$, которое в дискретные моменты времени t_{k+1} , $k = 0, 1, 2, \dots$, описывается выражением (12).

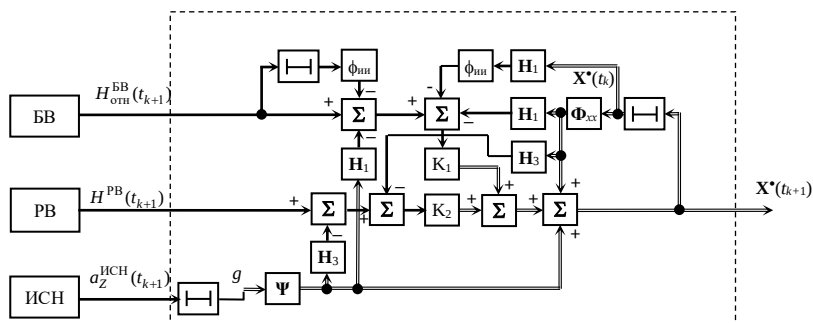


Рис. 2. Структурная схема обработки информации в информационно-измерительной и управляющей системе – НПК по сигналам РВ, ИНС и БА

Оценка вектора состояния $X^*(t_{k+1})$, полученная методами марковской теории оптимального оценивания по критерию минимума апостериорной дисперсии ошибок оценивания, будет определяться выражением [3, 4]

$$X^*(t_{k+1}) = \Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k) X^*(t_k) + \Psi(t_{k+1}, t_k) W(t_k) + K(t_{k+1}) [\xi_1(t_{k+1}) - \Phi_{uu}(t_{k+1}, t_k) \xi_1(t_k) - H_1(t_{k+1}) \Psi(t_{k+1}, t_k) W(t_k) + \Phi_{uu}(t_{k+1}, t_k) H_1(t_k) X^*(t_k) - H_1(t_{k+1}) \Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k) X^*(t_k)], \quad (19)$$

где $K(t_{k+1})$ – матрицы оптимальных коэффициентов передачи размером (4×1) , определяемая соотношениями (16), (17), в которых $P(t_{k+1})$ – матрица вторых центральных моментов (ковариаций) ошибок оценивания размером (4×4) ; $\Phi_{yx}(t_{k+1}, t_k)$, B_{xy} , B_{yy} – матрицы:

$$\Phi_{yx}(t_{k+1}, t_k) = H_1(t_{k+1}) \Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k) - \Phi_{ин}(t_{k+1}, t_k) H_1(t_k);$$

$$B_{xy} = \Gamma_x(t_{k+1}, t_k) \Gamma_x^T(t_{k+1}, t_k) H_1^T(t_{k+1});$$

$$B_{yy} = H_1(t_{k+1}) \Gamma_x(t_{k+1}, t_k) \Gamma_x^T(t_{k+1}, t_k) H_1^T(t_{k+1}) - \Phi_{ин}^2(t_{k+1}, t_k).$$

Уравнение (19) определяет структуру канала оптимальной обработки выходных сигналов БА и ИНС. Структурная схема канала обработки информации в информационно-измерительной и управляющей системе – навигационно-посадочном комплексе по сигналам ИНС и БА, разработанная на основе алгоритма (19) представлена на рис. 3.

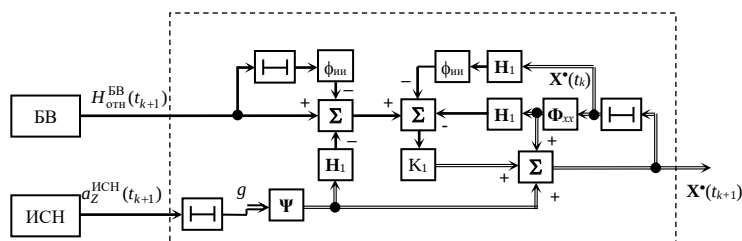


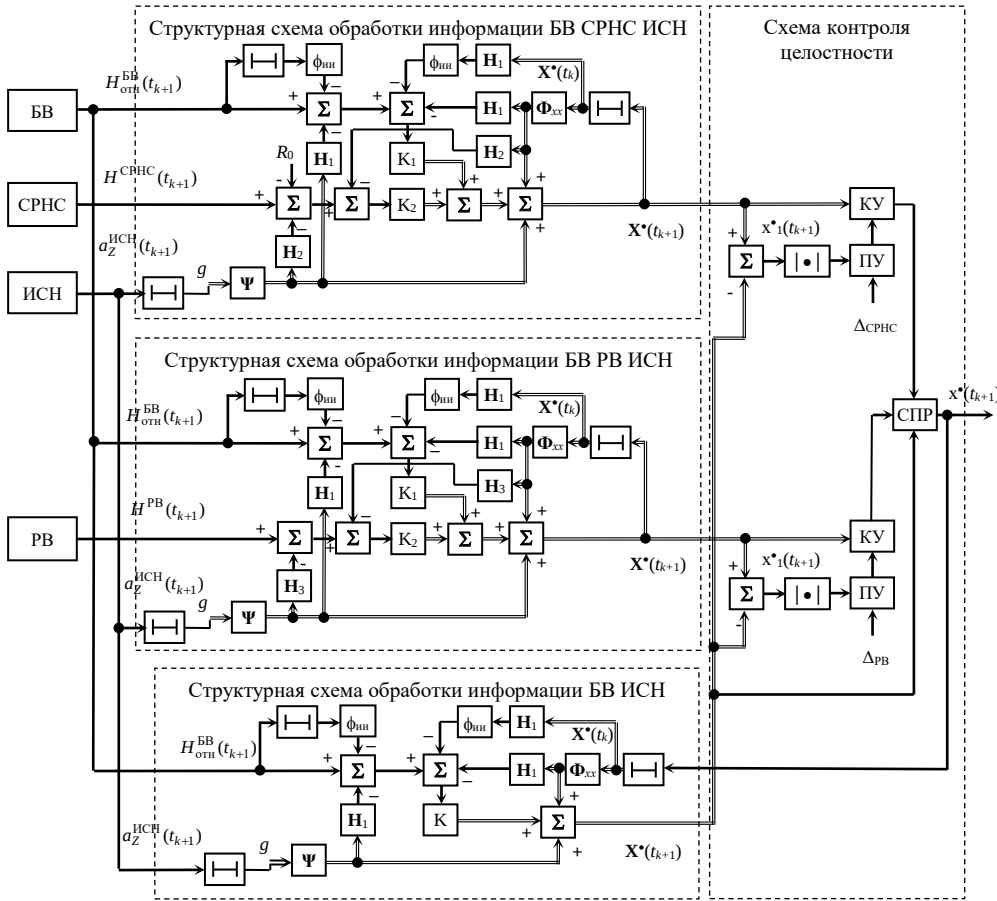
Рис. 3. Структурная схема обработки информации в информационно-измерительной и управляющей системе – НПК по сигналам ИНС и БА

В состав структурной схемы обработки информации входят сумматоры, усилители и линии задержки. Входным сигналом для схемы служит выходной сигнал БВ. Выходной сигнал ИНС используется в качестве вектора управления.

В соответствии с полученными оптимальными алгоритмами обработки информации разработана структурная схема обработки информации в информационно-измерительной и управляющей системе — навигационно посадочном комплексе с контролем целостности истинной высоты полета ЛА. Структурная схема, представленная на рис. 4, включает канал обработки информации по сигналам СРНС, ИНС и БВ; канал обработки информации по сигналам РВ, ИНС и БВ; канал обработки информации по сигналам ИНС и БВ; схему контроля целостности.

Алгоритм работы схемы контроля целостности следующий:

- определение значения модуля абсолютной ошибки оценивания истинной высоты (первая компонента $\dot{x}_1(t_{k+1})$ вектора состояния) между значением, вычисленным в канале обработки информации по сигналам СРНС, ИНС и БВ, и значением, вычисленным в канале обработки информации по сигналам ИНС и БВ. Сравнение этого значения в пороговом устройстве (ПУ) с допустимым значением $\Delta_{\text{СРНС}}$ и в случае, если модуль абсолютного значения ошибки превышает



**Рис. 4. Структурная схема обработки информации
в информационно-измерительной и управляющей системе –
НПК с контролем целостности истинной высоты полета ЛА**

пороговое значение, исключение оценки вектора состояния $\mathbf{X}^*(t_{k+1})$, полученной в канале обработки информации по сигналам СРНС, ИНС и БВ, из дальнейшей обработки;

– определение значения модуля абсолютной ошибки оценивания истинной высоты (первая компонента $x_1^*(t_{k+1})$ вектора состояния) между значением, вычисленным в канале обработки информации по сигналам РВ, ИНС и БВ, и значением, вычисленным в канале обработки информации по сигналам ИНС и БВ. Сравнение этого значения в ПУ с допустимым значением $\Delta_{РВ}$ и в случае, если модуль абсолютного значения ошибки превышает пороговое значение, исключение оценки вектора состояния $\mathbf{X}^*(t_{k+1})$, полученной в канале обработки информации по сигналам РВ, ИНС и БВ, из дальнейшей обработки;

– вычисление в схеме принятия решения (СПР) оценки вектора состояния $\mathbf{X}^*(t_{k+1})$ на выходе навигационно-посадочного комплекса. Оценка вычисляется как среднее арифметическое из всех оценок, поступающих на ее вход.

Отличительной особенностью схемы является то, что полученная на выходе оценка вектора состояния $\mathbf{X}^*(t_{k+1})$ в качестве обратной связи поступает в канал обработки информации по сигналам ИНС и БВ. Это позволяет производить коррекцию медленно нарастающих во времени ошибок ИНС по сигналам РВ и СРНС.

Заключение

Методами марковской теории оценивания случайных процессов проведен синтез оптимальных алгоритмов обработки информации для навигационно-посадочного комплекса с контролем целостности истинной высоты полета ЛА. Для обеспечения контроля целостности синтезированы три независимых канала обработки информации: канал обработки выходных сигналов СРНС, БВ и ИНС; канал обработки выходных сигналов РВ, БВ и ИНС; канал обработки выходных сигналов БВ и ИНС. Разработана структурная схема обработки информации в навигационно-посадочном комплексе.

Список литературы

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. – Изд. 3-е, перераб. – М. : Радиотехника, 2005. – 688 с.
2. Веремейко, К. К. Навигационно-посадочный комплекс на основе спутниковой радионавигационной системы / К. К. Веремейко, В. А. Тихонов // Радиотехника. – 1996. – № 1. – С. 94 – 107.
3. Ярлыков, М. С. Статистическая теория радионавигации / М. С. Ярлыков. – М.: Радио и связь, 1985. – 344 с.
4. Ярлыков, М. С. Марковская теория оценивания случайных процессов / М. С. Ярлыков, М. А. Миронов. – М. : Радио и связь, 1993. – 464 с.
5. Иванов, А. В. Обработка многомерных сигналов. Нелинейная многомерная обработка сигналов спутниковых радионавигационных систем в комплексах самолетовождения / А. В. Иванов. – М. : Радиотехника, 2012. – 176 с.
6. Адаптивные алгоритмы обработки информации в навигационных комплексах подвижных наземных объектов / А. В. Иванов, В. Ю. Шишкин, Д. В. Бойков, Н. А. Лежнева, А. А. Иванов // Радиотехника и электроника. – 2021. – № 8(66). – С. 1 – 12.

7. Ярлыков, М. С. Заход на посадку и посадка самолётов по сигналам спутниковых радионавигационных систем / М. С. Ярлыков, Н. Д. Пригонюк // Радиотехника. – 2001. – № 1. – С. 30 – 43.

8. Иванов, А. В. Определение аномальных измерений радиосигналов спутниковой радионавигационной системой методом статистической обработки невязок измерений / А. В. Иванов, С. П. Москвитин, Н. А. Лежнева, А. А. Иванов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2023. – Т. 29, № 1. – С. 27 – 40. doi: 10.17277/vestnik.2023.01.pp.027-040

9. Иванов, А. В. Совместное многоальтернативное обнаружение и оценивание сигналов спутниковых радионавигационных систем / А.В. Иванов // Радиотехника. – 2004. – № 7. – С. 29 – 36.

10. Бабич, О. А. Обработка информации в навигационных комплексах / О. А. Бабич. – М. : Машиностроение, 1991. – 512 с.

11. Иванов, А. В. Комплексные оптимальные алгоритмы обработки информации в навигационных системах подвижных наземных объектов с контролем целостности навигационного обеспечения / А.В. Иванов // Радиотехника. – 2010. – № 5. – С. 12 – 17.

Information-Measuring and Control System Based on Satellite Radionavigation System to Land Aircraft

A. V. Ivanov✉, S. P. Moskvitin, A. A. Ivanov, N. A. Lezhneva

Department of Radio Engineering, aleksandr-ivanov68@yandex.ru;
TSTU, Tambov, Russia

Keywords: anomalous measurements; object location; coordinates determination; satellite radio-navigation system.

Abstract: Synthesis of optimal algorithms for information-measuring and control system based on satellite radio-navigation system for solution of aircraft landing problems is carried out by methods of the Markov theory of estimation of random processes. Three independent channels for processing the output signals of the satellite radionavigation system, radio altimeter, barometric altimeter and inertial navigation system have been synthesized to ensure control over the integrity of navigation data. The block diagram of information processing in the information-measuring and control system with integrity control of the true flight altitude of the aircraft has been developed.

References

1. Perov A.I., Kharisov V.N. (Eds.) *GLONASS. Printsipy postroyeniya i funktsionirovaniya* [GLONASS. Principles of Design and Operation], Moscow: Radiotekhnika, 2005, 688 p. (In Russ.)

2. Veremeyko K.K., Tikhonov V.A. [Navigation and Landing Complex Based on a Satellite Radio Navigation System], *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 1996, no. 1, pp. 94-107. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Yarlykov M.S. *Statisticheskaya teoriya radionavigatsii* [Statistical Theory of Radio Navigation], Moscow: Radio i svyaz', 1985, 344 p. (In Russ.)

4. Yarlykov M.S., Mironov M.A. *Markovskaya teoriya otsenivaniya sluchaynykh protsessov* [Markov Theory of Estimation of Random Processes], Moscow: Radio i svyaz', 1993, 464 p. (In Russ.)

5. Ivanov A.V. *Obrabotka mnogomernykh signalov. Nelineynaya mnogomernaya obrabotka signalov sputnikovykh radionavigatsionnykh sistem v kompleksakh*

samoletovozhdeniya [Processing of multidimensional signals. Nonlinear multidimensional processing of signals of satellite radio navigation systems in aircraft navigation systems], Moscow: Radiotekhnika, 2012, 176 p. (In Russ.)

6. Ivanov A.V., Shishkin V.Yu., Boykov D.V., Lezhneva N.A., Ivanov A.A. [Adaptive algorithms for information processing in navigation systems of mobile ground objects], *Radiotekhnika i elektronika* [Radio Engineering and Electronics], 2021, no. 8(66), pp. 1-12. (In Russ., abstract in Eng.)

7. Yarlykov M.S., Prigonyuk N.D. [Approach and landing of aircraft using signals from satellite radio navigation systems], *Radiotekhnika* [Radio engineering], 2001, no. 1, pp. 30-43. (In Russ., abstract in Eng.)

8. Ivanov A.V., Moskvitin S.P., Lezhneva N.A., Ivanov A.A. [Determination of anomalous measurements of radio signals by a satellite radio navigation system using the method of statistical processing of measurement residuals], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2023, vol. 29, no. 1, pp. 27-40. doi: 10.17277/vestnik.2023.01.pp.027-040 (In Russ., abstract in Eng.)

9. Ivanov A.V. [Joint multi-alternative detection and evaluation of signals of satellite radio navigation systems], *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 2004, no. 7, pp. 29-36. (In Russ., abstract in Eng.)

10. Babich O.A. *Obrabotka informatsii v navigatsionnykh kompleksakh* [Information processing in navigation systems], Moscow: Mashinostroyeniye, 1991, 512 p. (In Russ.)

11. Ivanov A.V. [Complex optimal algorithms for information processing in navigation systems of mobile ground-based objects with integrity monitoring of navigation support], *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 2010, no. 5, pp. 12-17. (In Russ., abstract in Eng.)

Informationsmessende und -steuernde satellitengestütztes Funknavigationssystem für Lösung der Landeaufgaben der Luftfahrzeuge

Zusammenfassung: Unter Verwendung der Methoden der Markov-Theorie zur Schätzung zufälliger Prozesse ist die Synthese optimaler Algorithmen für ein Informationsmess- und Steuerungssystem auf Basis des Satellitenfunknavigationssystems zur Lösung von Problemen bei der Landung von Flugzeugen durchgeführt. Um die Kontrolle der Integrität der Navigationsdaten sicherzustellen, sind drei unabhängige Kanäle zur Verarbeitung der Ausgangssignale des Satellitenfunknavigationssystems, des Funkhöhenmessers, des barometrischen Höhenmessers und des Trägheitsnavigationssystems synthetisiert. Es ist ein Blockdiagramm der Informationsverarbeitung im Informationsmess- und Steuerungssystem mit Überwachung der Integrität der wahren Flughöhe des Flugzeugs entwickelt.

Système d'information, de mesure et de contrôle basé sur le système de radionavigation par satellite pour l'atterrissage d'aéronefs

Résumé: Par les méthodes de la théorie de Markov de l'évaluation des processus aléatoires sont synthétisés des algorithmes optimaux pour le système d'information, de mesure et de contrôle basé sur le système de radionavigation par satellite pour résoudre les problèmes d'atterrissage des aéronefs. Pour assurer le contrôle de l'intégrité des données de navigation, sont synthétisés trois canaux indépendants de traitement des signaux de sortie du système de radionavigation par satellite, de l'altimètre radio, de l'altimètre barométrique et du système de navigation inertielle. Est développé le schéma structurel du traitement de l'information dans le système d'information, de mesure et de contrôle avec le contrôle de l'intégrité de l'altitude réelle de l'aéronef.

Авторы: *Иванов Александр Васильевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Радиотехника»; *Москвитин Сергей Петрович* – кандидат тех-

нических наук, доцент кафедры «Радиотехника»; *Иванов Андрей Александрович* – аспирант кафедры «Радиотехника»; *Лежнева Наталия Александровна* – аспирант кафедры «Радиотехника»; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПРОВЕРКИ АППАРАТОВ ЗАЩИТЫ ОТ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО И ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ДУГОВЫХ ПРОБОЕВ И ИСКРОВЫХ ПРОМЕЖУТКОВ

Ю. Н. Ерашова^{1✉}, А. Н. Тюрин², Н. А. Гарифуллина¹, Л. Ф. Мусина¹

*Кафедра «Теоретические основы электротехники» (1), yuliya.kostina@mail.ru;
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»;
АО «Татэлектромонтаж» (2), Казань, Россия*

Ключевые слова: дуговой пробой; дуговой разряд; искрение; короткое замыкание; пожарная безопасность; устройство защиты от дуговых пробоев.

Аннотация: На основе требований по монтажу и эксплуатации устройств защиты от дуговых пробоев (УЗДП) предложено проводить их испытания на эффективность срабатывания. Проанализированы виды дуговых пробоев, модели установок для испытаний УЗДП. Представлено устройство для проверки аппаратов защиты от всех видов пробоев, в котором были устранены недостатки существующих подобных устройств. Для подтверждения работоспособности устройства проведены эксперименты, включающие в себя создание контролируемой ситуации дугового пробоя. Отмечено, что с помощью устройства для проверки аппаратов защиты от дуговых пробоев возможно создать условия, близкие к реальным. Представлены результаты, подтверждающие работоспособность предлагаемого устройства и сделаны выводы.

Введение

Среди основных причин возникновения возгорания электрооборудования следует отметить искрение и дуговые пробой. Для обнаружения и предотвращения пожаров в современных условиях привлекаются новейшие разработки и инновационные технологии, в соответствии с документом [1]. Для предупреждения пожаров, связанных с возникновением опасных искрений и дуговых пробоев, в соответствии с приказом Министра России №1005/пр от 28.12.2023 г., в электроустановках жилых и общественных зданий должно быть использовано специальное устройство защиты от дуговых пробоев (УЗДП), которое при обнаружении пробоя отключает поврежденную цепь. Необходимые требования, предъявляемые к УЗДП, и процедуру испытаний для таких устройств устанавливает ГОСТ IEC 62606–2016 [2]. В ходе эксплуатации УЗДП выявлен ряд сложностей, связанных с выбором и настройкой алгоритма обнаружения опасного искрения, а также отсутствием практики применения УЗДП в России, установки их в реальные электрические щиты. В этой связи появилась необходимость проведения испытаний, перечень которых устанавливает ГОСТ IEC 62606–2016. Процедуру этих испытаний практически подтверждают требования положений «Рекомендации по применению устройств защиты от дугового пробоя в электроустановках жилых и общественных зданий» СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа» [3, 4]. Проведем анализ имеющегося оборудования, которое может быть использовано для испытания УЗДП

на своевременное срабатывание при возникновении опасного искрения, переходящего в дуговой пробой. Для этого необходимо разобраться, какие виды пробоев существуют и как при этом отработывают средства защиты, имеющиеся в арсенале энергетиков.

Литературный обзор

На рисунке 1 представлены виды существующих дуговых пробоев. Подробно виды пробоев и вероятность срабатывания устройств защиты рассмотрены в работе [5].

Например, при последовательном дуговом пробое ни одно устройство защиты не срабатывает из-за значительного сопротивления в месте плохого контакта, где и происходит горение дуги. Значение тока в такой цепи не превышает номинальное, а для большинства автоматов защиты данный режим не считается аварийным, следовательно, отключения не произойдет. Параллельный дуговой разряд представляет собой короткое замыкание в цепи «питание – нагрузка». Такое замыкание встречается достаточно часто. Причинами возникновения параллельной дуги могут быть: перелом кабеля, повреждение кабеля фиксатором, нарушение изоляционного слоя из-за высокой влажности в помещении или длительного воздействия ультрафиолетового излучения, оголение и пережатие провода. Ток при параллельном дуговом разряде определяется только сопротивлением проводов системы электроснабжения. Если на ток параллельной дуги автомат защиты от токов коротких замыканий, вероятно, сработает, то на значение тока при последовательном дуговом разряде автоматический выключатель не сработает, что приведет к возгоранию провода.

Устройство защиты от дуговых пробоев относится к микропроцессорной технике. В состав УЗДП входит микроконтроллер, который выполняет цифровую обработку сигнала, поступающего из сети. Алгоритм расчета, заложенный производителем, на 80 % предназначен для определения последовательных дуговых пробоев. Оставшиеся 20 % отведены на определение параллельной дуги. Следовательно, в случае параллельного дугового пробоя УЗДП повышает надежность защиты, в случае последовательного пробоя УЗДП является единственным устройством защиты.

Стандартом [2] устанавливается предельное время срабатывания УЗДП. В ходе испытаний измеряемое время не должно превышать времени отключения по табл. 1.

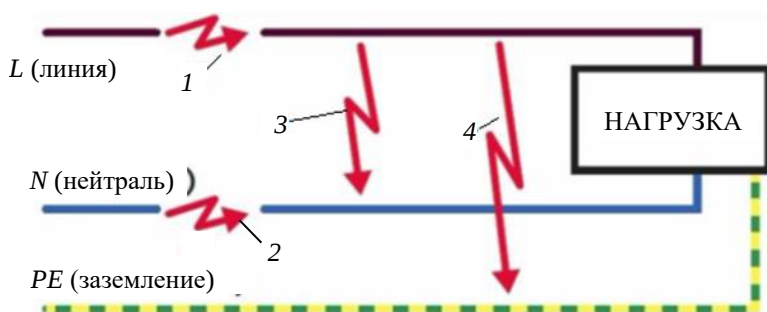


Рис. 1. Виды повреждений в электрических сетях до 1 кВ:

1, 2 – последовательный дуговой пробой «плохой контакт»;
3 – параллельный дуговой пробой; 4 – параллельный дуговой пробой на землю

Таблица 1

Предельные значения времени отключения для УЗДП на $U_{ном} = 230\text{ В}$

Испытательный ток дуги, А (действительное значение)	2,5	5,0	10,0	6,0	32,0	63,0
Максимальное время отключения, с	1,00	0,50	0,25	0,15	0,12	0,12

Авторы работы [6] предлагают модель для испытаний УЗДП на эффективность срабатывания при последовательном пробое. В качестве основного звена испытательной цепи используется дуговой генератор, который создает дуговой пробой, по своим характеристикам наиболее близкий к реальным. Существует генератор дуги для проведения эмиссионного спектрального анализа вещества в режиме дуги постоянного тока. Для решения поставленной задачи у известного генератора дуги есть существенный недостаток – он работает только в режиме дуги постоянного тока. Данный недостаток устранен в модели генератора электрической дуги [7], позволяющего генерировать электрическую дугу в электроустановках переменного тока, с последующим применением его для диагностики аппаратов защиты от дугового пробоя и искровых промежутков (рис. 2). Генератор электрической дуги подключен к источнику переменного напряжения и нагрузке. При разведении электродов с помощью регулировочного привода между подвижным латунным и неподвижным угольно-графитовым электродами возникает устойчивая электрическая дуга. На рисунке 3 представлены осциллограммы, полученные при работе дугового генератора. Характер дугового процесса, на который ориентируются производители УЗДП при настройке алгоритма работы микроконтроллера (рис. 4), полностью совпадает с полученными графическими данными. Подробно устройство и работа генератора дуги рассмотрены в работе [8].

Ранее создан испытательный стенд для проверки аппаратов защиты от дуговых пробоев и искровых промежутков [9]. Предлагаемое устройство должно обеспечить безопасную проверку на заявленные характеристики всех типов аппаратов защиты от последовательного дугового пробоя. В рассматриваемом устройстве опасная дуга создается с помощью генератора дуги (см. рис. 2). Недостатком этого устройства является отсутствие возможности испытывать УЗДП на эффективность срабатывания при параллельном пробое. Недостатки существующего устройства учтены и устранены в модели, представленной на рис. 5.

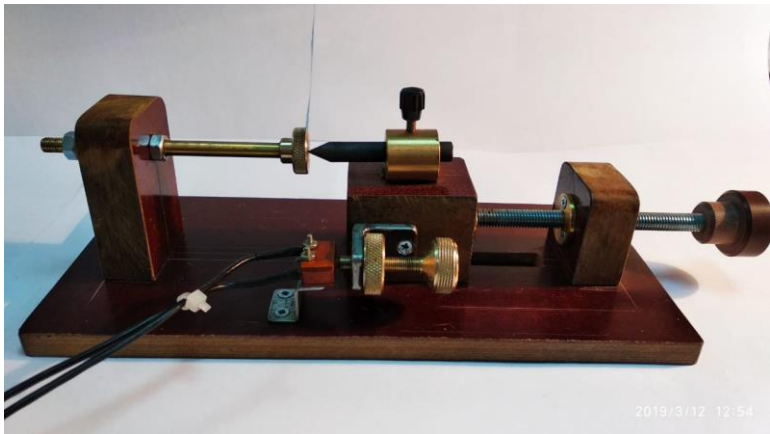


Рис. 2. Генератор электрической дуги

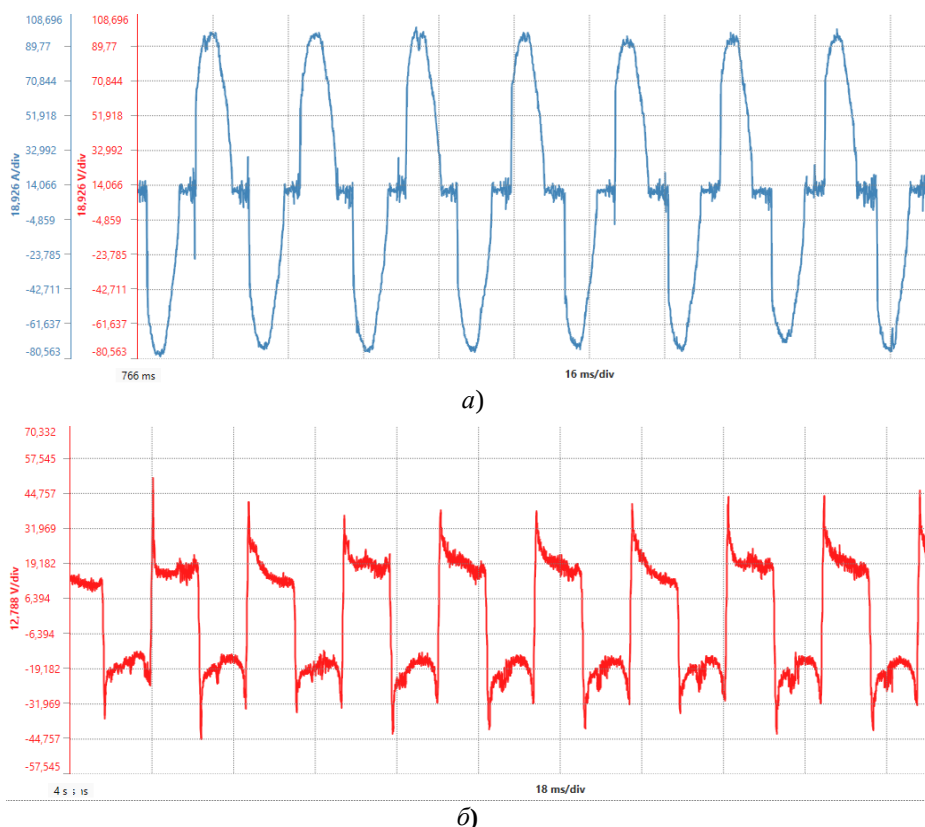


Рис. 3. Осциллограммы тока в искровом промежутке (а) и напряжения генератора дуги (б)

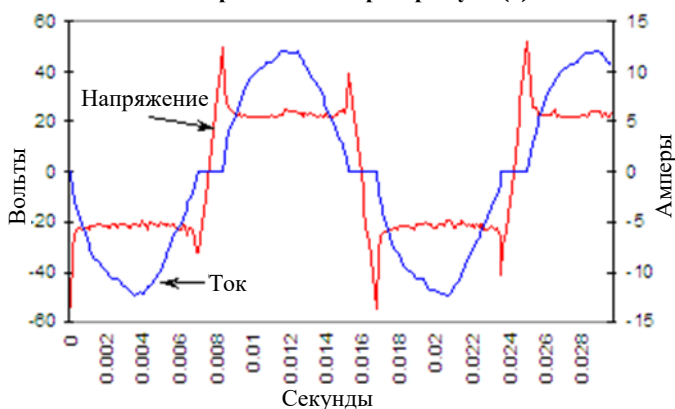


Рис. 4. Общий характер процесса при возникновении дуги в цепи переменного тока низкого напряжения

Эффект от внедрения устройства для проверки УЗДП достигается тем, что помимо источника электрической дуги, включенного последовательно в цепь, добавляется источник для параллельного дугового пробоя в виде образца кабеля с параллельными проводниками (см. рис. 5). В поврежденном образце кабеля при протекании тока формируется карбонизированный проводящий путь через изоляцию между двумя его проводниками. Ток короткого замыкания зависит от характера нагрузки и ее величины. Схема предлагаемого устройства представлена на рис. 6.



Рис. 5. Устройство для проверки аппаратов защиты от последовательного и параллельного дуговых пробоев и искровых промежутков

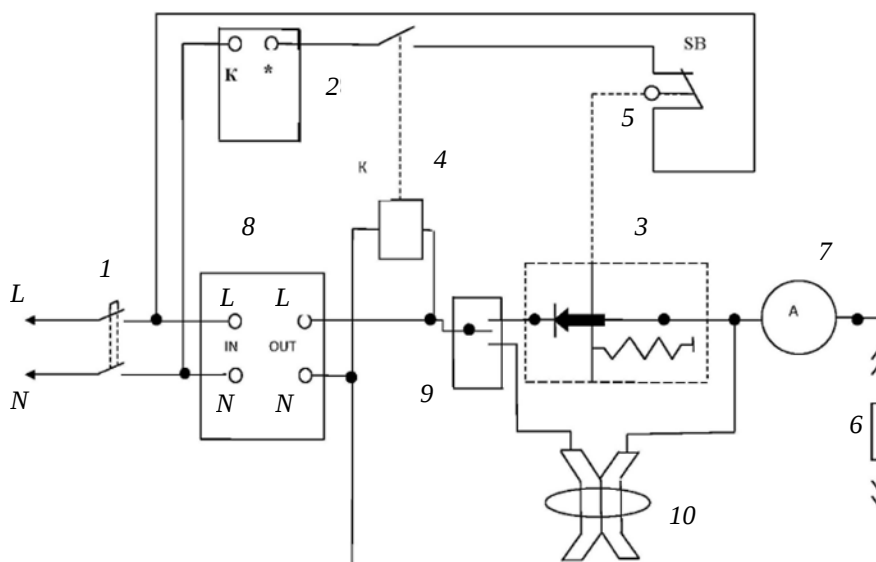


Рис. 6. Схема устройства для проверки аппаратов защиты от последовательного и параллельного дуговых пробоев и искровых промежутков

Устройство для проверки аппаратов защиты от последовательного и параллельного дуговых пробоев и искровых промежутков

Устройство для проверки аппаратов защиты от последовательного и параллельного дуговых пробоев и искровых промежутков работает следующим образом. При включении автоматического выключателя 1 на вход устройства подается напряжение сети. С помощью переключателя 9, работающего в ручном режиме, выбирается вид пробоя. При выборе последовательного дугового пробоя срабатывает пускатель 4, подготавливая цепь секундомера 2 и генератора дуги 3. Ток, протекающий через замкнутый генератор дуги 3 и подключенную нагрузку 6, измеряется амперметром 7. После того как замеры тока сделаны, электроды размыкают при помощи регулировочного винта генератора дуги, создавая искровой промежуток с последующим возникновением устойчивой электрической дуги. Одновременно с этим замыкается концевой выключатель 5 и запускается се-

кундомер 2. Под воздействием дуги на исправном аппарате защиты происходит его срабатывание с отключением секундомера и прекращение горения дуги, при этом секундомер фиксирует время срабатывания аппарата.

В случае параллельного дугового пробоя переключатель 9 переводит питание сети с генератора дуги на кабель с параллельными проводниками 10. В образце кабеля формируется дуговой пробой, ток которого определяется величиной и характером регулируемой нагрузкой 6. Одновременно с этим запускается секундомер. Значение протекающего тока контролируется амперметром 7. Исправный аппарат защиты под воздействием параллельного дугового пробоя срабатывает, что приводит к прекращению горения дуги. Секундомер фиксирует время, в течение которого сработал аппарат защиты. В случае неисправности аппарата защиты, независимо какой выбран дуговой пробой – параллельный или последовательный, отключение не происходит и цепь размыкается принудительно.

Результаты эксперимента

Проводились испытания стенда в двух режимах – последовательном и параллельном дуговых пробоях. При проверке УЗДП на эффективность срабатывания от последовательного дугового пробоя использовалась активная нагрузка 3 А при напряжении сети 230 В. Секундомер зафиксировал время срабатывания испытуемого аппарата защиты $t_{сраб} = 0,66$ с, когда максимальное время срабатывания по табл. 1 при токе дуги $I = 2,5$ А составляет $t_{max} = 1$ с. Измеряемое время не превышает предела, установленного стандартом.

Для производителя УЗДП проводились испытания на параллельный дуговой пробой. При этом использовали образец кабеля с повреждением, включенный параллельно с нагрузкой на 100 А и 75 А (рис. 7). Время срабатывания при нагрузке 100 А $t_{сраб} = 0,1$ с, а при нагрузке 75 А $t_{сраб} = 0,12$ с, что также не превышает максимального значения по ГОСТу.



Рис. 7. Испытательная установка для тестирования УЗДП на эффективность срабатывания при параллельном дуговом пробое

Заключение

Таким образом, преимущество предлагаемого устройства для проверки аппаратов защиты от последовательного и параллельного дуговых пробоев является то, что устройство позволяет проверить на заявленные характеристики УЗДП как при последовательном, так и параллельном дуговых пробоях. Следует отметить, что для обеспечения безопасной проверки УЗДП в устройстве присутствуют защита от токов короткого замыкания и перегрузки. В устройстве предусмотрена возможность регулирования значения и характера тока нагрузки, что позволяет повысить точность проверки на заявленные характеристики для всех типов УЗДП.

Список литературы

1. Основы государственной политики Российской Федерации в области пожарной безопасности на период до 2030 года : Указ Президента Российской Федерации от 01.01.2018 № 2 // Собрание законодательства Российской Федерации. 2018. № 2. Ст. 411.
2. ГОСТ ИЕС 62606–2016. Устройства защиты бытового и аналогичного назначения при дуговом пробое. Общие требования. – Введ. 25–10–1916. – М. : Стандартинформ, 2017. – 30 с.
3. Об утверждении изменения № 6 к СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа» от 29 августа 2016 г. № 602/пр : приказ Минстрой России от 28 декабря 2023 г. № 1005/пр // Офиц. сайт Минстрой России. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/361147/> (дата обращения: 10.10.2024).
4. Об утверждении перечня национальных стандартов и сводов правил (частей таких стандартов и сводов правил), в результате применения которых на обязательной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» от 30.12.2009 № 384-ФЗ (последняя редакция) : постановление Правительства Российской Федерации от 28.05.2021 г. № 815 // Собрание законодательства Российской Федерации. 2021. № 23. Ст. 4060.
5. Испытания устройства защиты от дугового пробоя и искровых промежутков на срабатывание / Ю. Н. Ерашова, И. В. Ившин, И. И. Ившин, А. Н. Тюрин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – № 3(23). – С. 168 – 180.
6. Королев, И. В. Моделирование срабатывания УЗДП в электрических сетях 0,4 кВ / И. В. Королев, П. В. Валуев, Д. А. Бурдюков // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2019. – № 6(57). – С. 124 – 127.
7. Пат. 199462 U1 РФ, МПК H02H 7/00 G01R 31/12 G01R 31/08. Генератор электрической дуги / Тюрин А. Н., Солуянов Ю. И., Шмуклер М. И., Ившин И. В.; заявл. 25.05.2020; опубл. 02.09.2020, Бюл. № 25. 5 с.
8. Генератор электрической дуги для диагностики аппаратов защиты от дугового пробоя / Ю. Н. Ерашова, А. И. Вассунова, И. И. Ившин, А. Н. Тюрин // Тинчуринские чтения – 2021 «Энергетика и цифровая трансформация». В 3 т. Т. 1. Электроэнергетика и электроника : матер. Междунар. молод. науч. конф. (Казань, 28 – 30 апр. 2021) / под общ. ред. Э. Ю. Абдуллазянова. – Казань, 2021. – С. 104 – 108.
9. Пат. на полезную модель RU200084U1. Генератор электрической дуги: / Тюрин А. Н., Солуянов Ю. И., Шмуклер М. И., Ившин И. В.; заявл. 22.05.2020 ; опубл. 05.10.2020, Бюл. № 28. 5 с.

Arc-Fault Protection Devices against Sequential and Parallel Arc Breakdowns and Arc Gaps

Yu. N. Erashova¹✉, A. N. Tyurin², N. A. Garifullina¹, L. F. Musina¹

*Department of Theoretical Bases of Electrical Engineering (1),
yuliya.kostina@mail.ru; Kazan State Power Engineering University;
JSC "Tatelektromontazh" (2), Kazan, Russia*

Keywords: arc breakdown; arc discharge; sparking; short-circuit; fire safety; protection device against arc breakdown.

Abstract: Using the requirements for installation and operation of arc-fault protection devices it is suggested to test them for efficient operation. The types of arc faults, models of installations for testing of arc fault protection devices are analyzed. A device for testing protection devices against all kinds of breakdowns is presented, in which the disadvantages of existing similar devices have been eliminated. To confirm the performance of the device, experiments including the creation of a controlled situation of arc breakdown are carried out. It is noted that it is possible to create conditions close to real conditions with the help of the device for testing of arc-fault protection devices. The results confirming the operability of the proposed device are presented and conclusions are drawn.

References

1. [Fundamentals of the state policy of the Russian Federation in the field of fire safety for the period up to 2030: Decree of the President of the Russian Federation dated 01.01.2018 No. 2], *Sobranie zakonodatel'stva RF* [Collection of Legislation of the Russian Federation], 2018, no. 2, art. 411. (In Russ.)
2. GOST IEC 62606-2016. *Ustroystva zashchity bytovogo i analogichnogo naznacheniya pri dugovom proboye. Obshchiye trebovaniya* [Arc fault protection devices for household and similar purposes. General requirements], Moscow: Standartinform, 2017, 30 p. (In Russ.)
3. available at: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/361147/> (accessed 10 October 2024).
4. [On approval of the list of national standards and codes of practice (parts of such standards and codes of practice), the application of which ensures mandatory compliance with the requirements of the Federal Law "Technical Regulations on the Safety of Buildings and Structures" dated December 30, 2009 No. 384-FZ (latest revision): Resolution of the Government of the Russian Federation dated May 28, 2021 No. 815], *Sobranie zakonodatel'stva RF* [Collection of Legislation of the Russian Federation], 2021, no. 23, art. 4060. (In Russ.)
5. Yerashova Yu.N., Ivshin I.V., Ivshin I.I., Tyurin A.N. [Testing the operation of an arc flashover and spark gap protection device] *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki* [News of higher educational institutions. Problems of power engineering], 2021, no. 3(23), pp. 168-180. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Korolev I.V., Valuyev P.V., Burdyukov D.A. [Modeling the operation of an arc flashover and spark gap protection device in 0.4 kV electrical networks], *Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye* [Electric power. Transmission and distribution], 2019, no. 6(57), pp. 124-127. (In Russ., abstract in Eng.)
7. Tyurin A.N., Soluyanov Yu.I., Shmukler M.I., Ivshin I.V. *Generator elektricheskoy dugi* [Electric arc generator], Russian Federation, 2020, Pat. 199462. (In Russ.)
8. Yerashova Yu.N., Vassunova A.I., Ivshin I.I., Tyurin A.N. *Tinchurinskiye chteniya - 2021 "Energetika i tsifrovaya transformatsiya", in 3 vols., vol. 1.*

Elektroenergetika i elektronika : mater. Mezhdunar. molod. nauch. konf. [Tinchurin Readings - 2021 "Power Engineering and Digital Transformation". In 3 vols. Vol. 1. Electric Power Industry and Electronics: Proc. Int. Youth Sci. Conf] (Kazan', 28-30 April 2021), Kazan', 2021, pp. 104-108. (In Russ.)

9. Tyurin A.N., Soluyanov Yu.I., Shmukler M.I., Ivshin I.V. *Generator elektricheskoy dugi* [Electric arc generator], Russian Federation, 2020, Pat. RU200084U1. (In Russ.)

Gerät zur Prüfung von Schutzeinrichtungen gegen Serien- und Parallelfehler der Störlichtbögen und Funkenstrecken

Zusammenfassung: Basierend auf den Anforderungen an die Installation und den Betrieb von Störlichtbogenschutzgeräten (AFPD) ist vorgeschlagen, diese auf ihre Ansprecheffizienz zu testen. Es sind Arten von Lichtbogendurchschlägen und Modelle von Installationen zum Testen von AFDCs analysiert. Es ist ein Gerät zur Prüfung von Schutzgeräten gegen Störungen aller Art vorgestellt, bei dem die Mängel bestehender gleichartiger Geräte beseitigt wurden. Um die Funktionsfähigkeit des Geräts zu bestätigen, sind Experimente durchgeführt, einschließlich der Schaffung einer kontrollierten Lichtbogendurchschlagssituation. Es ist darauf hingewiesen, dass mit einem Gerät zum Testen von Lichtbogenschutzgeräten realitätsnahe Bedingungen geschaffen werden können. Die Ergebnisse, die die Leistung des vorgeschlagenen Geräts bestätigen, sind vorgestellt und Schlussfolgerungen sind gezogen.

Dispositif de contrôle des appareils de protection contre les pannes d'arcs et les étincelles en série et en parallèle

Résumé: A la base des prescriptions relatives à l'installation et à l'utilisation des dispositifs de protection contre les défauts des arcs, est proposé d'effectuer des essais d'efficacité. Sont analysés les types de pannes d'arc, les modèles d'installations pour les tests. Est présenté le dispositif de vérification des dispositifs de protection contre tous les types de pannes, dans lequel sont éliminés les défauts des dispositifs similaires existants. Pour confirmer le fonctionnement de l'appareil, sont menées des expériences, notamment la création d'une situation de rupture d'arc contrôlée. Il est à noter qu'avec l'aide d'un dispositif de vérification des dispositifs de protection contre les pannes d'arc, il est possible de créer des conditions proches à la réalité. Sont présentés les résultats qui confirment l'efficacité du dispositif proposé et sont tirées des conclusions.

Авторы: *Ерашова Юлия Николаевна* – старший преподаватель кафедры «Теоретические основы электротехники», ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»; *Тюрин Александр Николаевич* – кандидат технических наук, главный технолог, АО «Татэлектромонтаж»; *Гарифуллина Надежда Александровна* – старший преподаватель кафедры «Теоретические основы электротехники»; *Мусина Лилия Фаритовна* – преподаватель кафедры «Теоретические основы электротехники», ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», Казань, Россия.

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ПЕРВИЧНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

В. Н. Чернышов¹, А. П. Королев²✉

*Кафедры: «Уголовное право и прикладная информатика в юриспруденции» (1),
«Материалы и технология», korolevanpal@yandex.ru (2),
ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: зависимость выходного тока от температуры; конструкторско-топологические параметры; первичный измерительный преобразователь температуры; полевая структура; режим обогащения основными носителями заряда; чувствительность.

Аннотация: Проведен сравнительный анализ эксплуатационных характеристик (диапазона измерения температуры, потребления энергии) металлических и полупроводниковых первичных измерительных преобразователей (ПИП) температуры, который показал значительное преимущество и целесообразность проектирования и применения полупроводниковых преобразователей. Построена математическая модель, описывающая зависимость выходного тока разрабатываемого ПИП на основе МДП-структуры от температуры с учетом основных конструкторско-топологических и электрофизических параметров структуры. Рассмотрено влияние конструкторско-топологических и электрофизических параметров на потребление энергии преобразователем, что является важным в авиационной технике. Используя разработанную и подтвержденную экспериментально математическую модель, рассчитаны выходные характеристики при разных условиях. Проведен анализ и исследование результатов моделирования в целях выявления оптимальных конструкторско-топологических и электрофизических параметров, при которых спроектированный ПИП потребляет малое количество энергии. В результате получена и описана конструкция ПИП температуры на основе структуры «металл – диэлектрик – полупроводник» с конструкторско-топологическими и электрофизическими параметрами, обеспечивающими малое потребление энергии, что позволит эффективно его использовать в летательных аппаратах.

Введение

Измерение температуры осуществляется в различных областях, таких как промышленность, медицина, авиация, оборона и т.д. В авиационной технике контроль температуры играет важную роль в системах электронного обеспечения. Сегодня ограничение по потребляемой энергии – основное требование к первичным измерительным преобразователям (ПИП) температуры в автономном управлении. Преобразователи температуры по материалу изготовления можно разделить на два класса: металлические и полупроводниковые, принцип работы которых основан на изменении величины удельной электропроводимости в зависимости от температуры.

Материал для металлического термометра сопротивления должен иметь высокий температурный коэффициент сопротивления, низкую электропроводность, однородность состава, устойчивость к окислительным процессам, высокую температуру плавления. Температурный коэффициент сопротивления металлических тонких пленок – напыленных термопар [1] и терморезисторов [2], по модулю гораздо меньше, чем у монокристаллических полупроводников. Причем, меньший температурный коэффициент сопротивления существенно уменьшает чувствительность. Еще одним недостатком металлических терморезисторов является низкое удельное сопротивление, что создает проблемы при их коммутации с измерительной аппаратурой, имеющей невысокое входное сопротивление.

В настоящее время находят широкое применение преобразователи температуры на монокристаллических полупроводниках с высокой надежностью [3], которые имеют следующие преимущества – более высокое удельное сопротивление, высокий температурный коэффициент сопротивления и устойчивость к окислению при росте температуры. Достаточно давно для измерения температуры применяются диоды, включенные в схему с обратной проводимостью. Такие приборы хорошо выполняют функцию преобразователя температуры, но в узком диапазоне. Возможно создание высокочувствительных ПИП температуры на основе транзисторов [4]. Значительные перспективы применения имеют полевые структуры металл – диэлектрик – полупроводник, на основе которых можно спроектировать ПИП температуры с малым потреблением энергии.

Известны ПИП температуры на полупроводниках [5 – 7], применяемые в космической технике, построенные на основе комплементарной структуры металл – диэлектрик – полупроводник (КМДП) – пары n - и p -канального транзисторов. Указанные ПИП температуры, представляющие собой КМДП-транзисторы, имеют относительно низкое потребление энергии. Следует отметить, что данные преобразователи работают в предпороговой области в режиме инверсии основных носителей заряда, напряжение питания которых составляет 0,8 В. Потребление энергии можно понизить уменьшением напряжения питания, применяя более совершенную структуру ПИП в предпочтительном режиме работы – обогащения основными носителями заряда.

Цель работы – создание первичного измерительного преобразователя температуры, имеющего следующие характеристики: низкое напряжение питания (важное для применения в летательных аппаратах); высокую чувствительность; малые массогабаритные размеры.

Модель, описывающая выходную характеристику разрабатываемого ПИП

Отличительной особенностью предлагаемого ПИП, сформированного на кремниевой подложке n -типа [8] (легированной донорной примесью), является работа в режиме обогащения основными носителями заряда – электронами. На затвор подается положительный потенциал, и созданное им поле формирует между истоком и стоком канал из электронов – основных носителей заряда (режим обогащения). Отличие от приведенных в работах [5 – 7] преобразователей – потенциал на затворе при работе в режиме обогащения не имеет порогового значения, следовательно, электропроводность в канале существует при любом значении потенциала на затворе, самом малом, что значительно уменьшает потребление энергии. Принцип работы преобразователя температуры основан на термогенерации носителей заряда. С ростом температуры происходит ионизация примесных и собственных атомов полупроводника, отдающих электроны, что приводит к увеличению удельной электропроводности.

Для ПИП температуры разработана модель, описывающая выходную характеристику – зависимость тока стока I_D от температуры [9]

$$I_D = \frac{Z}{L} V_{SD} \mu_n \left[-V_G + \left(V_D + \frac{2kT}{e} \ln \frac{N_D}{BT^{3/2} \exp\left(-\frac{E_G(0)}{2kT}\right)} \right) \right] \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_i}{d},$$

где I_D – ток стока ПИП, А; Z, L – ширина и длина канала ПИП соответственно, см; V_{SD} – напряжение между истоком и стоком, В; μ_n – подвижность основных носителей заряда электронов; V_G, V_D – напряжения на затворе и стоке соответственно, В; k – постоянная Больцмана, Дж/К; T – температура, К; e – заряд электрона, Кл; N_D – концентрация донорных атомов, см⁻²; ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость; ε_i – относительная диэлектрическая проницаемость подзатворного диэлектрика, Ф/см; d – толщина подзатворного диэлектрика, см; $E_G(0) = 1,17$ эВ – ширина запрещенной зоны полупроводника, экстраполированная к $T = 0$ К.

Температурная зависимость концентрации собственных носителей заряда электронов [10]

$$n_i(T) = BT^{3/2} \exp[-E_G(0)/(2kT)],$$

где $B = 3,873 \cdot 10^{16} \text{ К}^{-3/2} \cdot \text{см}^{-3}$.

К решению технической задачи для достижения поставленной цели применен комплексный подход. Проведено исследование влияния каждого электрофизического параметра (потенциалов на затворе V_G и стоке V_D соответственно, концентрации примеси N_D) и конструкторско-топологических параметров (ширины Z и длины L канала, толщины подзатворного диэлектрика d) на требуемые характеристики. В результате получено достаточно низкое напряжение питания при высокой чувствительности.

Для определения электрофизических и конструкторско-топологических параметров ПИП температуры проведены необходимые расчеты, используя представленную модель. Для достижения цели снижения потребляемой энергии сделан расчет зависимостей влияния параметров ПИП температуры на напряжение питания.

Наиболее оптимальные с точки зрения экономии питающего напряжения при сохранении чувствительности характеристики изображены на рис. 1, где показано: *зависимость 1* – для нелегированного кремния; потенциалы на затворе V_G и стоке V_D равны 0,001 и 0,006 В соответственно; толщина подзатворного диэлектрика $d = 5\text{E}-6$ см; ширина канала $Z = 0,05$ см; длина канала $L = 4\text{E}-5$ см; *зависимость 2* – для нелегированного кремния; потенциал на затворе $V_G = 0,001$ В; потенциал на стоке $V_D = 0,002$ В; толщина подзатворного диэлектрика $d = 5\text{E}-6$ см; ширина канала $Z = 0,1$ см; длина канала $L = 4\text{E}-5$ см; *зависимость 3* – для легированного кремния с концентрацией донорной примеси $N_D = 10^2 \text{ см}^{-2}$; потенциал на затворе $V_G = 0,003$ В; потенциал на стоке $V_D = 0,005$ В; толщина подзатворного диэлектрика $d = 5\text{E}-6$ см; ширина и длина канала соответственно $Z = 0,1$ см и $L = 4\text{E}-5$ см.

При изменении потенциала на затворе V_G выходные характеристики незначительно отличаются между собой. При большем значении потенциала на затворе V_G

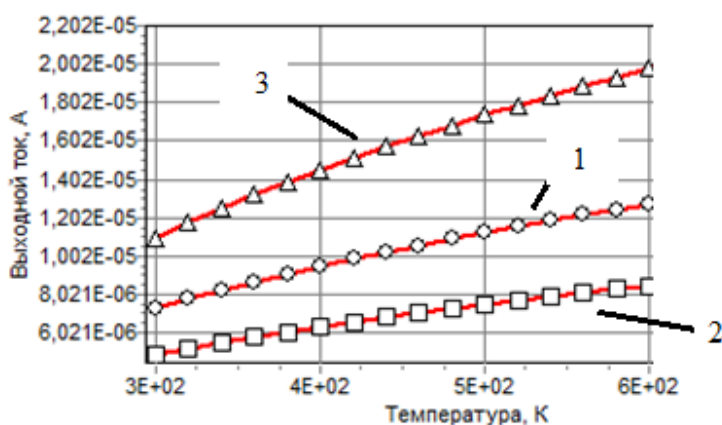


Рис. 1. Зависимость тока стока I_D от температуры

уровень тока несколько выше, чем при меньшем, что объясняется увеличением концентрации носителей заряда под затвором. Согласно зависимости, в полупроводнике с ростом концентрации электронов n удельная электропроводимость σ растёт, соответственно растёт и уровень тока

$$\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p),$$

где n, p – концентрации электронов и дырок соответственно; μ_n, μ_p – подвижности электронов и дырок соответственно.

При уменьшении отношения напряжений на затворе и стоке V_G/V_D незначительно увеличивается крутизна выходной характеристики – чувствительность ПИП. Это объясняется тем, что устраняется шунтирующее действие потенциала на затворе. Электроны меньше рассеиваются на поверхности подложки под изолированным затвором и более направленно движутся в канале от истока к стоку. Для рассмотренных значений потенциала на затворе V_G выходные характеристики (зависимости тока стока от температуры) незначительно отличаются друг от друга. Следовательно, целесообразно на затвор подавать невысокий потенциал $V_G = 0,001$ В, который обеспечивает малое напряжение питания ПИП и не является пробивным напряжением тонкого подзатворного диэлектрика.

Важной характеристикой предлагаемого ПИП являются и конструктивно-топологические параметры – ширина канала $Z = 0,1$ см, длина канала $L = 4E-5$ см. Габариты узкие. Малая площадь и узкий габарит обеспечивают значительный отвод тепла. Следовательно, ширина канала $Z = 0,1$ см является приемлемой и оптимальной, обеспечивает высокую чувствительность и преимущества в габаритах. Проектируемый преобразователь температуры выполнен в виде меандра (рис. 2).

Из результатов вышеприведенного исследования следует вывод, что наиболее оптимальными электрическими и конструктивно-

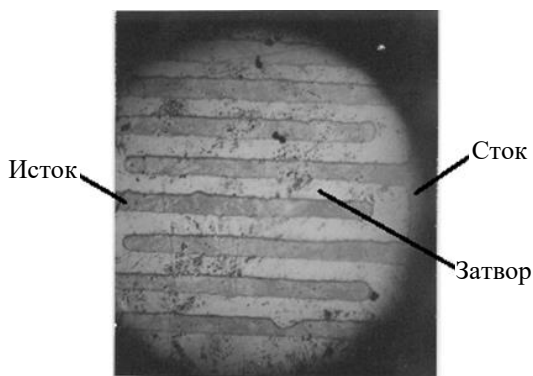


Рис. 2. Микрофотография топологии лабораторного образца

топологическими параметрами ПИП являются потенциалы на затворе $V_G = 0,001$ В и стоке $V_D = 0,005$ В, толщина подзатворного диэлектрика $d = 5E-6$ см, длина и ширина канала соответственно $L = 4E-5$ и $Z = 0,1$ см.

Рассмотрим, как влияет примесь на требуемые к ПИП характеристики – низкое напряжение питания, высокую чувствительность, малые массогабаритные размеры, диапазон измерения и линейность.

В данном случае большую чувствительность при малом напряжении питания имеет зависимость с большей концентрацией примеси, но меньшей линейности. Меньшая линейность объясняется тем, что при повышении температуры сначала ионизируются примесные атомы и собственные – характеристика более круто возрастает, затем, когда все примесные атомы отдали лишние электроны, ионизируются только собственные – крутизна характеристики уменьшается. Наблюдается плавный перелом значения функции в зависимости тока от температуры, который делит характеристику на два более линейных диапазона измерения температуры. При значительной концентрации примеси чувствительность будет уменьшаться, так как при большой концентрации свободных носителей заряда их подвижность, от которой зависит удельная электропроводимость полупроводника, уменьшается в результате увеличения рассеивания на примесных атомах. При большой концентрации примеси полупроводник может превратиться в вырожденный, который имеет металлический характер проводимости, то есть уменьшение проводимости с ростом температуры. В результате проведенных исследований оптимальным легированием является концентрация примеси $N_D = 10^2 \text{ см}^{-2}$, которая обеспечивает чувствительность $30 \text{ нА/}^\circ\text{С}$ и малое потребление напряжения питания $V_D = 0,005$ В.

После анализа полученных характеристик разрабатываемого ПИП определялись усредненные параметры. Выходная характеристика показана на рис. 3, где концентрация донорной примеси $N_D = 10^2 \text{ см}^{-2}$; потенциалы на затворе V_G и стоке V_D равны $0,001$ и $0,005$ В соответственно; толщина подзатворного диэлектрика $d = 5E-6$ см; ширина и длина канала соответственно $Z = 0,1$ см и $L = 4E-5$ см.

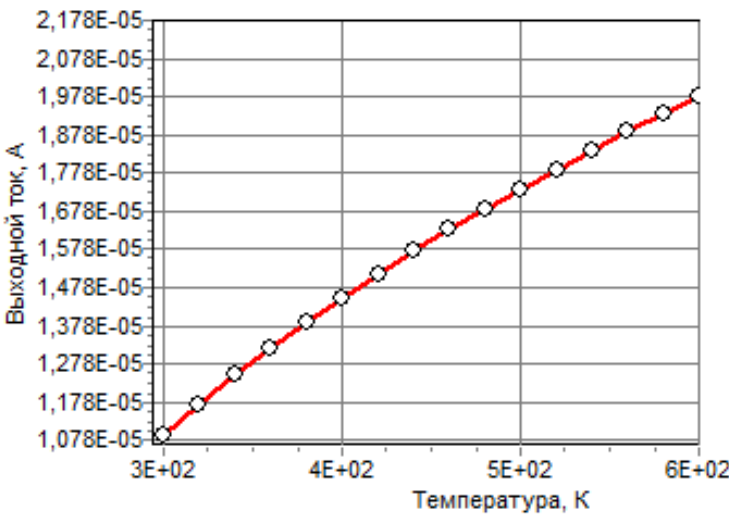


Рис. 3. Зависимость тока стока I_D от температуры для легированного кремния

Чувствительность такой характеристики достаточно высокая – 30 нА/°С при малом потреблении энергии (больше, чем в рассматриваемых ранее приборах для измерения температуры, которая составляет 0,024 нА/°С).

Понижение энергопотребления ПИП достигается учетом большего числа электрофизических и конструкторско-топологических параметров преобразователя в математическом выражении выходной характеристики и применением режима работы не в режиме инверсии, а обогащением основными носителями заряда. Режим обогащения не требует подачи порогового напряжения, что приводит преобразователь в рабочее состояние при любом потенциале на затворе. Потребление энергии разрабатываемого преобразователя температуры регулируется электрофизическими и конструкторско-топологическими параметрами, входящими в зависимость, описывающую выходную характеристику, такими как: потенциалы на затворе и стоке, концентрация примеси, ширина и длина канала, толщина подзатворного диэлектрика.

Для эксперимента изготовлен опытный образец с оптимальными параметрами: длина и ширина канала $L = 4\text{E}-5$ см и $Z = 0,1$ см соответственно, толщина подзатворного диэлектрика $d = 5\text{E}-6$ см, при потенциале на затворе $V_G = 0,001$ В и на стоке $V_D = 0,005$ В, концентрация донорной примеси $N_D = 10^{22}$ см⁻³. При изготовлении опытного образца ПИП подзатворный диэлектрик формировался только в сухом кислороде без использования паров воды в целях получения очень тонкого и качественного оксида кремния. На рисунке 4 представлены экспериментальная выходная характеристика – зависимость выходного тока от температуры, и рассчитанная.

Эксперимент показал, что чувствительность ПИП составляет (28...30) нА/°С, которая является высокой среди преобразователей такого класса, линейность удовлетворяет требованиям при малом потреблении напряжения V_D в интервале 0,005...0,006 В. Максимальное различие выходных характеристик, рассчитанной теоретически и полученной экспериментально, составляет не более 5 – 6 %.

Спроектированный ПИП потребляет мало энергии, что очень важно при использовании в авиационной технике. Потенциал подается на затвор ПИП $V_G = 0,001...0,0015$, напряжение питания на стоке $V_D = 0,005...0,006$ В, что позволяет уменьшить потребление энергии, которое важно для использования ПИП в авиационной технике с ограничением источников питания, и может увеличить срок службы. К преимуществу перед преобразователем на КМДП-транзисторах

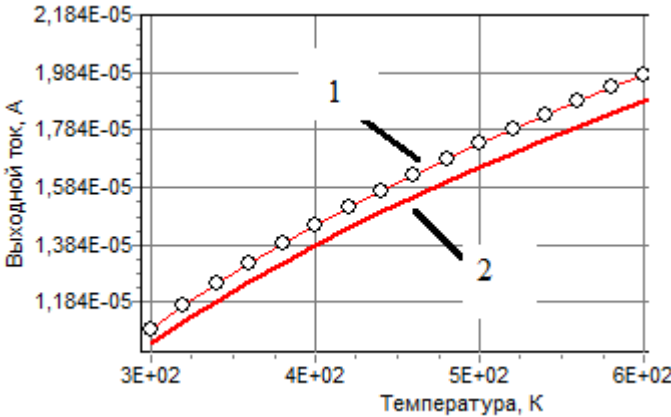


Рис. 4. Рассчитанная 1 и экспериментальная 2 зависимости тока стока I_D от температуры

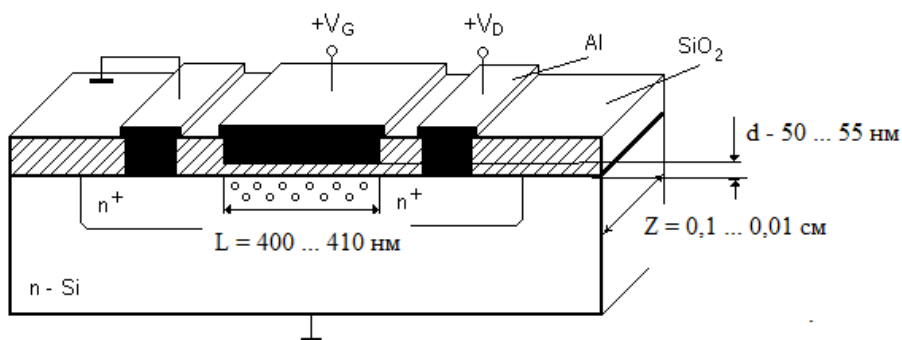


Рис. 5. Структура разработанного ПИП температуры:

Al – алюминиевые контакты; SiO₂ – оксид кремния; n – тип проводимости (электронный)

следует отнести и тот факт, что проектируемый ПИП используется в виде одной ячейки, в то время как на КМДП – четыре ячейки. Это позволяет уменьшить потребление энергии в 4 – 5 раз.

Структура разработанного ПИП с топологическими размерами представлена на рис. 5.

Заключение

Проведенный анализ показал, что металлические преобразователи имеют малый температурный коэффициент сопротивления, следовательно, малую чувствительность и точность измерения; низкое удельное сопротивление, которое создает проблемы при их коммутации с измерительной аппаратурой, имеющей невысокое входное сопротивление.

Разработана математическая модель, описывающая зависимость выходного тока от температуры ПИП на основе МДП-структуры, позволяющая определить оптимальные значения электрофизических и конструкторско-топологических параметров, обеспечивающих высокую чувствительность и, как следствие, точность измерения температуры. Предложен режим работы разработанного ПИП температуры при обогащении основными носителями заряда в подзатворной области МДП-структуры, который существенно уменьшает (в 4–5 раз) потребление энергии по сравнению с потреблением известными ПИП температуры на основе КМДП-структуры, работающими в режиме инверсии в предпороговой области.

Из вышесказанного следует, что разработанный ПИП температуры найдет широкое применение в авиационной технике.

Список литературы

1. Пат. 2 772 665 С1 Российская Федерация, МПК G01K 7/22 (2006.01) ; G01K 15/00 (2006.01). Датчик температуры / Разуваев Ю. Ю., Войнов В. В., Петричкович Я. Я. ; патентообладатель АО НПЦ «Электронные вычислительно-информационные системы». – № 2021128632 ; заявл. 30.09.2021 ; опубл. 23.05.2022, Бюл. № 15 – 1 с.
2. Линьков, Е. Датчик температуры на терморезисторе с протоколом DS1820 / Е. Линьков // Компоненты и технологии. – 2022. – № 11-12(255). – С. 20 – 23.
3. Гушин, В. Серия высоконадежных интегральных датчиков температуры / В. Гушин, И. Корепанов, И. Слепченко // Компоненты и технологии. – 2022. – № 1 (246). – С. 16–17.
4. Иванов, Д. Н. Датчик температуры на основе транзисторов с инжекционно-емкостной связью / Д. Н. Иванов, А. В. Леонов // Наноиндустрия. – 2022. – Т. 15, № S8-2(113). – С. 553 – 555. doi: 10.22184/1993-8578.2022.15.8s.553.555

5. A 0.6 V 117 nW high performance energy efficient system-on-chip (SoC) CMOS temperature sensor in 0.18 μm CMOS for aerospace applications / D. Prasad, V. Nath, V. Vishwanthan, M. Mehta // *Microsystem Technologies*. – 2019. – Vol. 25, No. 7. – P. 2301 – 2311. doi: 10.1007/s00542-018-4115-8
6. Sahafi, A. Nano Watt CMOS temperature sensor / A. Sahafi, J. Sobhi, Z. D. Koozehkanani // *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*. – 2013. – Vol. 75, No. 3. – P. 343 – 348. doi: 10.1007/s10470-013-0046-6
7. Pandey, A. Study and Design of 40 nW CMOS Temperature Sensor for Space Applications / A. Pandey, V. Nath // *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*. – 2015. – Vol. 13, No. 3. – P. 813 – 819. doi: 10.12928/TELKOMNIKA.v13i3.1426
8. Пат. 2 254 559 Российская Федерация, МПК G 01 K 3/08, 7/24. Устройство для измерения разности температур / Коробов Р. М., Брусенцов Ю. А., Королев А. П., Фесенко А. И. ; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. техн. ун-та. – № 2003136657/28 ; заявл. 17.12.2003 ; опубл. 20.06.2005, Бюл. №17. – 5 с.
9. Брусенцов, Ю. А. Исследование электрофизических процессов в полевых полупроводниковых структурах для измерения теплофизических характеристик / Ю. А. Брусенцов, А. П. Королев, А. В. Озаренко // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2006. – Т. 12, № 1. – С. 122 – 128.
10. Тугов, Ч. М. Полупроводниковые приборы / Ч. М. Тугов. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.

Semiconductor Primary Measuring Temperature Transducer for Air Vehicles

V. N. Chernyshov¹, A. P. Korolev²✉

*Departments: Criminal Law and Applied Informatics in Jurisprudence (1);
Materials and Technology, korolevanpal@yandex.ru (2), TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: dependence of output current on temperature; design and topological parameters; primary temperature measuring transducer; field structure; enrichment mode of the main charge carriers; sensitivity.

Abstract: A comparative analysis of operational characteristics (temperature measurement range, energy consumption) of metallic and semiconductor primary temperature measuring transducers (TMT) has been carried out, which has shown a significant advantage and feasibility of designing and using semiconductor transducers. A mathematical model describing the dependence of the output current of the developed TMT on the basis of “metal – dielectric – semiconductor” structure on temperature taking into account the main design-topological and electrophysical parameters of the structure is constructed. The influence of design-topological and electro-physical parameters on energy consumption of the converter, which is important in aviation technology, is considered. Using the developed and experimentally confirmed mathematical model, the output characteristics under different conditions are calculated. The simulation results are analyzed and investigated to identify the optimal design-topological and electrophysical parameters at which the designed TMT consumes a low value of energy. As a result, the design of the temperature TMT based on the structure “metal – dielectric – semiconductor” with design-topological and electrophysical parameters providing low power consumption was obtained and described, which will allow its efficient use in air vehicles.

References

1. Razuvayev Yu.Yu., Voynov V.V., Petrichkovich Ya.Ya. *Datchik temperature* [Temperature sensor], Russian Federation, 2022, Pat. 2772665 (In Russ.)
2. Lin'kov Ye. [Temperature sensor on a thermistor with DS1820 protocol], *Komponenty i tekhnologii* [Components and technologies], 2022, no. 11-12(255), pp. 20-23. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Gushchin V., Korepanov I., Slepchenkov I. [A series of highly reliable integrated temperature sensors], *Komponenty i tekhnologii* [Components and technologies], 2022, no. 1 (246), pp. 16-17. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Ivanov D.N., Leonov A.V. [Temperature sensor based on transistors with injection-capacitive coupling], *Nanoindustriya* [Nanoindustry], 2022, vol. 15, no. S8-2(113), pp. 553-555. doi: 10.22184/1993-8578.2022.15.8s.553.555 (In Russ., abstract in Eng.)
5. Prasad D., Nath V., Vishwanthan V., Mehta M. A 0.6 V 117 nW high performance energy efficient system-on-chip (SoC) CMOS temperature sensor in 0.18 μm CMOS for aerospace applications, *Microsystem Technologies*, 2019, vol. 25, no. 7, pp. 2301-2311. doi: 10.1007/s00542-018-4115-8
6. Sahafi A., Sobhi J., Koozehkanani Z.D. Nano Watt CMOS temperature sensor, *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 2013, vol. 75, no. 3, pp. 343-348. doi: 10.1007/s10470-013-0046-6
7. Pandey A., Nath V. Study and Design of 40 nW CMOS Temperature Sensor for Space Applications, *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*, 2015, vol. 13, no. 3, pp. 813-819. doi: 10.12928/TELKOMNIKA.v13i3.1426
8. Korobov R.M., Brusentsov Yu.A., Korolev A.P., Fesenko A.I. *Ustroystvo dlya izmereniya raznosti temperatur* [Device for measuring temperature differences], Russian Federation, 2005, Pat. 2254559 (In Russ.)
9. Brusentsov Yu.A., Korolev A.P., Ozarenko A.V. [Study of electrophysical processes in field semiconductor structures for measuring thermal-physical characteristics], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2006, vol. 12, no. 1, pp. 122-128. (In Russ., abstract in Eng.)
10. Tugov Ch.M. *Poluprovodnikovyye pribory* [Semiconductor devices], Moscow: Energoatomizdat, 1990, 576 p. (In Russ.)

Halbleiter-Primärmessgerät, Temperaturwandler für Flugzeuge

Zusammenfassung: Es ist eine vergleichende Analyse der Betriebseigenschaften (Temperaturmessbereich, Energieverbrauch) von metallischen und Halbleiter-Primärtemperaturmesswandlern (PTR) durchgeführt. Der Vergleich zwischen metallischen und Halbleiter-Primärtemperaturmesswandlern (PTC) zeigte den erheblichen Vorteil und Zweckmäßigkeit der Entwicklung und Anwendung von Halbleiter-Messwandlern. Es ist ein mathematisches Modell erstellt, das die Abhängigkeit des Ausgangsstroms des entwickelten PIP auf der Basis der TIR-Struktur von der Temperatur unter Berücksichtigung der wichtigsten design-topologischen und elektrophysikalischen Parameter der Struktur beschreibt. Der Einfluss der konstruktiv-topologischen und elektrophysikalischen Parameter auf die in der Luftfahrttechnik wichtige Leistungsaufnahme des Konverters ist berücksichtigt. Mit Hilfe des entwickelten und experimentell validierten mathematischen Modells sind die Ausgangseigenschaften unter verschiedenen Bedingungen berechnet. Die Simulationsergebnisse sind analysiert und untersucht, um die optimalen design-topologischen und elektrophysikalischen Parameter zu ermitteln, bei denen der entworfene PIP einen niedrigen Energieverbrauch aufweist. Als Ergebnis ist das Design des Temperatur-PIPs auf der Basis der Struktur „Metall - Dielektrikum - Halbleiter“ mit

design-topologischen und elektrophysikalischen Parametern, die einen niedrigen Energieverbrauch ermöglichen, erhalten und beschrieben, was seinen effektiven Einsatz in Flugzeugen ermöglichen wird.

Transmetteur de température primaire à semi-conducteurs pour aéronefs

Résumé: Est donnée une analyse comparative des caractéristiques opérationnelles (plage de mesure de la température, consommation d'énergie) des métaux et des transducteurs de mesure primaires (TMP) à semi-conducteurs de la température, qui ont montré un avantage significatif et la performance de la conception et de l'application des transducteurs à semi-conducteurs. Est construit un modèle mathématique décrivant la dépendance du courant de sortie du TMP en cours de développement à la base de la structure, en tenant compte des principaux paramètres de conception et ceux topologiques et électrophysiques de la structure. Est montré l'impact des paramètres sur la consommation d'énergie du transducteur, qui est important dans l'ingénierie aéronautique. À l'aide d'un modèle mathématique développé et validé expérimentalement, sont calculées les caractéristiques de sortie dans de différentes conditions. Sont effectuées l'analyse et l'étude des résultats. Est décrite la conception de TMP de température à la base de la structure "métal-diélectrique - semi-conducteur" avec des paramètres assurant une faible consommation d'énergie ce qui lui permettra d'être utilisé efficacement dans les aéronefs.

Авторы: *Чернышов Владимир Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Уголовное право и прикладная информатика в юриспруденции»; *Королев Андрей Павлович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материалы и технология», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

ПРИНЦИПЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ МНОГОАССОРТИМЕНТНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

С. В. Карпушкин✉, М. Н. Краснянский

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

Ключевые слова: автоматизированное проектирование; многоассортиментное химическое производство; принципы декомпозиции, моделирования, оптимальности и проектируемости; технологическое оборудование.

Аннотация: Представлены принципы, которыми рекомендовано руководствоваться при автоматизированном проектировании технологического оборудования многоассортиментных химических производств: декомпозиции общей задачи проектирования на ряд взаимосвязанных подзадач, моделирования проектных решений с ориентацией на формирования полей определяемых параметров, оптимальности проектных решений и проектируемости. Принципы проиллюстрированы на примере задачи определения аппаратурного оформления химико-технологической системы проектируемого многоассортиментного химического производства.

Введение

Автоматизированное проектирование технических систем включает комплекс задач, постановка и решение которых основаны на использовании методов системного анализа, математического моделирования, оптимизации, обработки информации.

Особенности многоассортиментных химических производств (МХП), такие как широкий ассортимент выпускаемой продукции при небольших (менее 1000 т/год) объемах выпуска продуктов и частых изменениях ассортимента, существенно усложняют процесс их проектирования. Примерами МХП могут служить производства синтетических красителей и полупродуктов, фармацевтических препаратов, химических реактивов. Химико-технологические системы (ХТС) МХП, как правило, ориентированы на выпуск нескольких марок продукции, сходных по технологии синтеза, причем в каждый момент времени осуществляется выпуск единственного продукта. Химико-технологические системы МХП работают в периодическом режиме, то есть продукты выпускаются отдельными партиями, которые последовательно проходят все этапы переработки, предусмотренные технологическими регламентами. Стадии ХТС представляют собой совокупности основных и вспомогательных аппаратов, предназначенных для реализации этапов переработки партий продуктов.

На основе многолетнего опыта работы с проектными организациями и проектно-конструкторскими подразделениями промышленных предприятий, участия в проектировании десятков промышленных технических систем химико-техно-

гического профиля предлагаются принципы автоматизированного проектирования технологического оборудования МХП, которые могут служить руководством для проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в данной области.

Принцип декомпозиции общей задачи проектирования

Детальная формулировка общей задачи проектирования оборудования МХП, как правило, бессмысленна, так как высокая размерность и сложная система разнородных ограничений делают ее решение невозможным. Общую задачу следует представлять в виде системы взаимосвязанных локальных задач и предусматривать реализацию итерационной процедуры их совместного решения с необходимой коррекцией исходных данных для следующей итерации по результатам выполнения предыдущей [1].

Среди локальных задач выделим определение числа ХТС и ассортимента их продукции, выбор аппаратурного оформления (АО) стадий каждой ХТС, размещение технологического оборудования всех ХТС в производственном помещении, разработку календарного плана выпуска продукции, методика решения каждой из которых также предусматривает декомпозицию на локальные подзадачи.

В качестве примера рассмотрим задачу определения АО одной из ХТС проектируемого МХП. Исходными данными для ее решения являются наименования продуктов и объемы выпуска каждого из них (месячные, квартальные или годовые), технологические регламенты синтеза продуктов. Результат решения: число и типоразмеры основных аппаратов каждой стадии, параметры режима функционирования оборудования каждой стадии и системы в целом, обеспечивающие требуемую производительность по каждому продукту при минимальных затратах на оборудование и энергообеспечение. Эта задача относится к классу задач смешанного дискретно-нелинейного программирования (*англ.* Mixed Integer-Nonlinear Programming), общепринятая методика решения которых до настоящего времени не разработана.

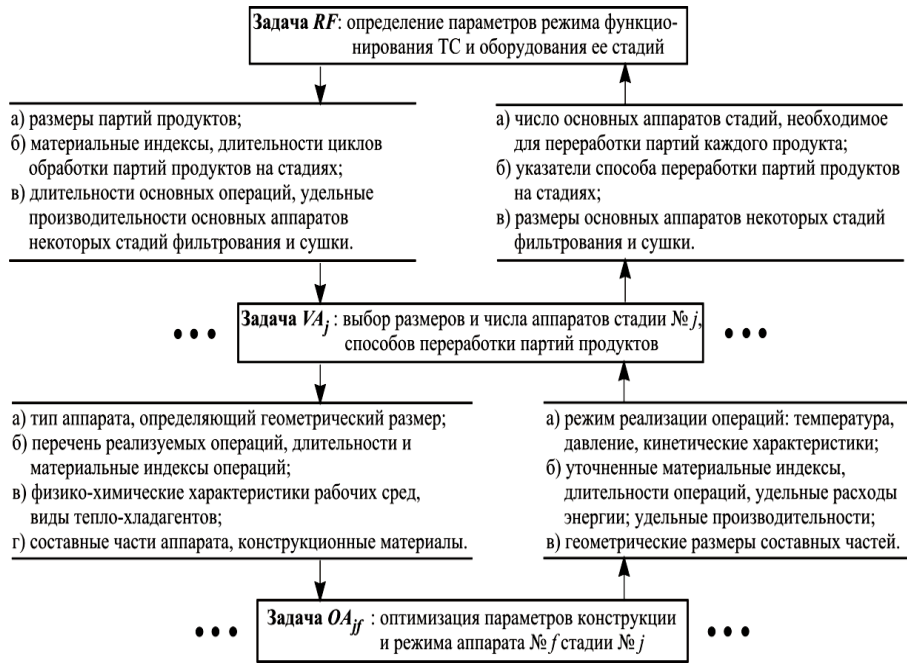


Рис. 1. Иерархия задач АО ТС МХП и информационные связи между ними

Предлагаемая стратегия декомпозиции задачи определения аппаратного оформления ТС МХП, в отличие от рассмотренных ранее [2 – 4], базируется на принципе разделения параметров задачи по характеру их изменения: отделения параметров режима функционирования ХТС, изменяющихся непрерывно, от дискретных характеристик оборудования ее стадий. С учетом определяющего влияния параметров режима функционирования ХТС на АО стадий системы в качестве задачи верхнего уровня иерархии выбрана задача RF оптимизации параметров режима функционирования ХТС при выпуске в течение планового периода T_p всех продуктов заданного ассортимента I в требуемых объемах Q_i , $i = 1, \dots, I$. На среднем уровне решаются задачи VA_j , $j = 1, \dots, J$, выбора определяющих размеров и числа основных аппаратов каждой из J ее стадий, а также способов переработки партий продуктов основными аппаратами каждой стадии системы. На нижнем уровне – задачи OA_{jf} оптимизации параметров конструкции и режима функционирования f -го аппарата стадии j (рис. 1).

В свою очередь, задачи OA_{jf} , $j = 1, \dots, J$, $f = 1, \dots, F_j$, для каждого из F_j аппаратов стадии j также могут быть декомпозированы на основе разбиения всех его элементов на основные, формирующие рабочую зону, и вспомогательные, непосредственно не влияющие на рабочую зону, но необходимые для нормального функционирования [5]. Соответственно, сначала осуществляется поиск параметров основных элементов, на основании результатов которого определяются параметры вспомогательных элементов (рис. 2).

Прежде чем находить параметры основных элементов, необходимо определить их типы. При расчете основных технологических и конструктивных параметров некоторые конструктивные параметры приходится задавать, так как их

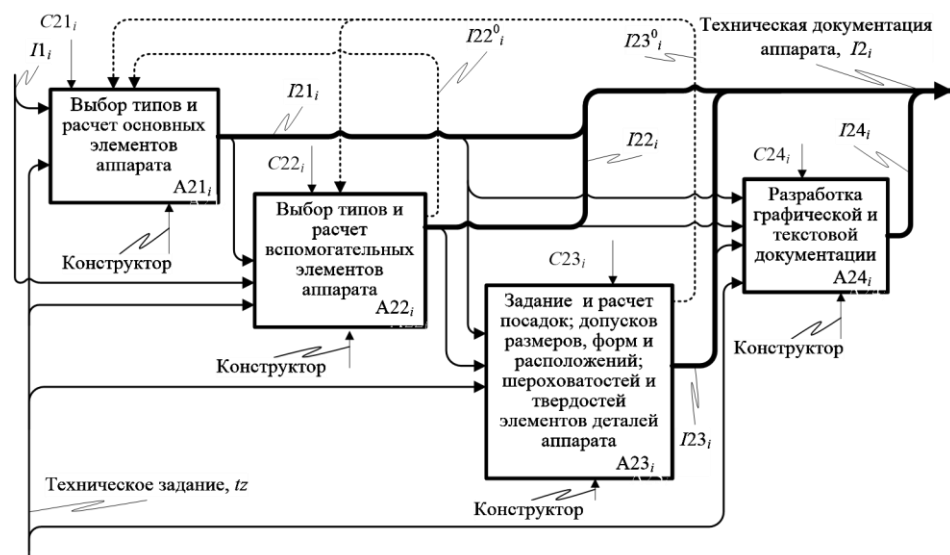


Рис. 2. Функциональная диаграмма разработки аппарата стадии ХТС:

tz – техническое задание на разработку аппарата; I_1 , I_2 – соответственно основные и вспомогательные элементы аппарата и их размеры; $C21$, $C22$, $C23$, $C24$ – нормативные документы, методики расчетов; $I21$, $I22$ – типы вспомогательных элементов и их основные размеры соответственно; $I23$ – унитарные (зависящие от основных) размеры вспомогательных элементов аппарата; $I24$ – графическая и текстовая документация на элементы аппарата; $I22^0$ – перечень и размеры вспомогательных элементов, выбор которых может повлиять на результаты поиска параметров основных элементов; $I23^0$ – перечень значений формы и расположения, выбор которых может повлиять на результаты выбора основных или вспомогательных элементов

значения не могут быть найдены на данном уровне. Например, толщина стенки корпуса емкостного аппарата, которая влияет на тепловые процессы, протекающие в рабочей зоне аппарата, относится к вспомогательным параметрам и определяется на уровне АЗ.

Вспомогательные элементы, как правило, являются стандартными или типовыми. Задачи их выбора часто сводятся к разрешению условий вида «ЕСЛИ ..., ТО...». В нормативных документах вспомогательные элементы представлены таблицами типоразмеров. При известном типе элемента его выбор осуществляется по одному или нескольким параметрам, однозначно определяющим значения всех остальных. Например, параметры фланцевого соединения (число и диаметр отверстий под болты, толщина тарелки, размеры уплотнительной поверхности и др.) определяются по внутреннему диаметру тарелки фланца.

Принцип моделирования проектных решений

Вид соотношений и область определения математической модели проектного решения прямо следуют из постановки задачи проектирования. Математическая модель проектного решения может включать математические модели процессов, реализуемых в объекте проектирования, если они разработаны и уровень их детализации достаточен для целей проектирования.

Желательно, чтобы математические модели процессов, реализуемых в объекте проектирования, были ориентированы на формирование полей определяемых параметров: концентраций, температур, скоростей потоков, нагрузок, деформаций и т.д. Процесс принятия проектных решений с применением таких математических моделей сводится к подбору сочетаний параметров конструкции и режима функционирования исследуемого объекта, обеспечивающих оптимальные значения параметров объекта.

Например, при решении задачи оптимизации параметров конструкции и режима функционирования механического перемешивающего устройства вертикального емкостного аппарата (одной из задач OA_{jf}) для математического описания процесса механического перемешивания использованы осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса в цилиндрической системе координат при допущении о симметричности поля скоростей перемешиваемой среды относительно оси вращения мешалки, то есть постоянства осредненного значения составляющей вектора скорости $\bar{u}_\varphi$ (φ – полярный угол) во всем объеме аппарата (обусловлено ослаблением тангенциальных потоков жидкости при установившемся режиме перемешивания за счет существенного усиления радиальных и аксиальных потоков) [6]. Поэтому моделируется определение осредненных значений составляющих вектора скорости $\bar{u}_l$ и $\bar{u}_r$ (по высоте l и радиусу r аппарата), соответствующих комбинации фиксированных значений частоты вращения вала мешалки n , ее диаметра D_m , высоты лопасти H_m и высоты расположения над днищем аппарата h_{hm} для установившегося (квазистационарного) течения гомогенной жидкости в аппарате при постоянной температуре.

Для компьютерного моделирования процесса перемешивания жидкости в вертикальном емкостном аппарате механической мешалкой использована программа Open FOAM [7], ввиду того, что ее кросс-компилированная версия Blue CFD, предназначенная для работы под управлением операционных систем Windows, является свободно распространяемым инструментарием вычислительной гидродинамики для операций с полями. На рисунке 3 представлены изображения полей скоростей, полученные при оптимальных значениях n , D_m , H_m и h_{hm} для различных типов мешалок, устанавливаемых в лабораторном аппарате.

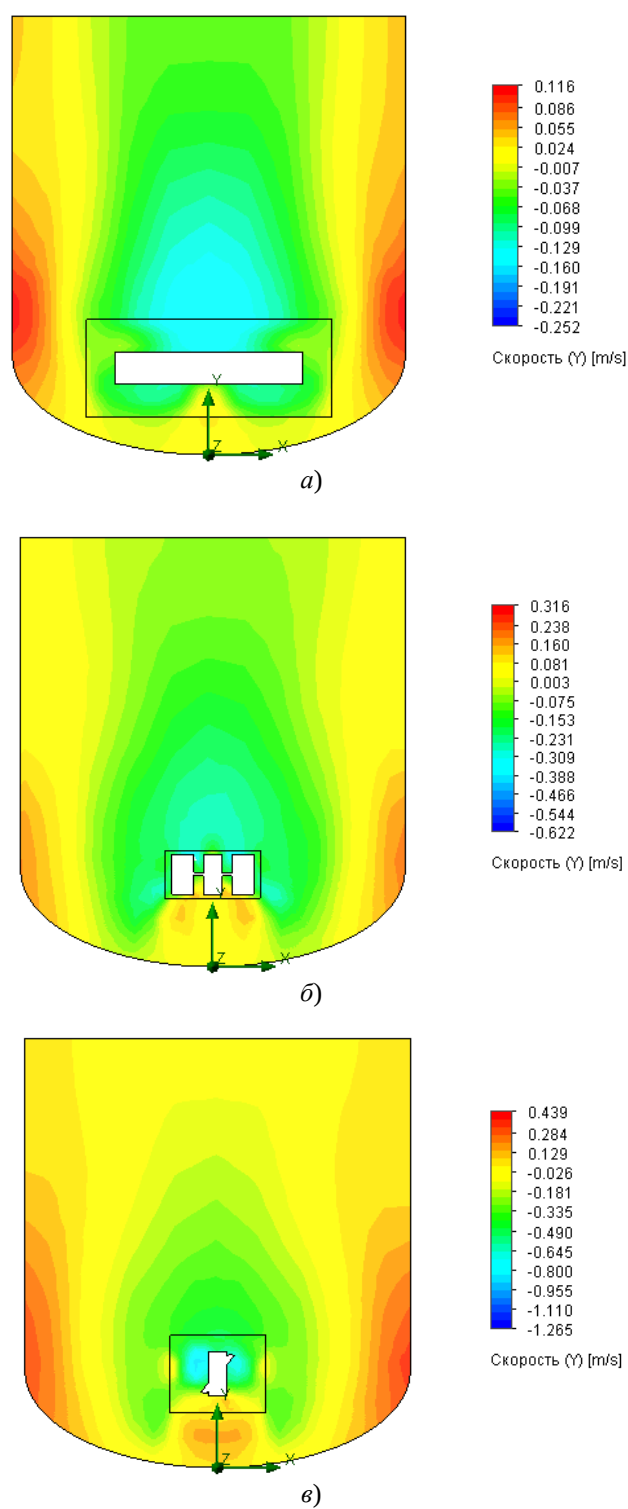


Рис. 3. Поля скоростей перемешиваемой жидкости в вертикальном емкостном аппарате при оптимальных значениях параметров мешалок:
a – двухлопастной; *б* – турбинной открытой; *в* – трехлопастной

С применением такого подхода к моделированию процесса механического перемешивания проведены работы по расчету и подбору эффективного перемешивающего устройства с якорной мешалкой для промышленного аппарата, входящего в ХТС производства фталоцианина меди в цехе №15 АО «Пигмент» (Тамбов).

В ходе расчетов выявлено, что оптимальная с точки зрения степени равномерности поля скоростей высота установки мешалки $h_{hm} = 0,05D_m$, оптимальная высота лопасти мешалки $H_m = 0,85D_m$ при рекомендации нормативного документа НИИХИММАШ [8] $H_m = 0,7D_m$, диаметр мешалки $D_m = 0,95D_r$ (D_r – внутренний диаметр аппарата) при рекомендации [8] $D_m = (0,7 \dots 0,9)D_r$. Ширину лопасти мешалки потребовалось увеличить до значений $L_m = 0,15D_m$ при рекомендации [8] $L_m = 0,07D_m$.

После проведения пусконаладочных работ и опытной эксплуатации была подтверждена эффективность предложенной компоновки, которая позволила сократить продолжительность стадии с 20 до 18 ч (увеличение мощности производства с 1188 до 1320 т/год). Помимо этого, потребляемая при перемешивании мощность привода мешалки уменьшилась на 16 %.

Отсутствие математических моделей реализуемых процессов не является препятствием для разработки математической модели проектного решения: используется информация из технического задания на проектирование, регламентов выпуска продуктов и нормативных документов (ГОСТ, РД, РТМ).

Принцип оптимальности проектных решений

Задачи проектирования следует формулировать как задачи математического программирования или вариационные, то есть обосновывать выбор критерия (критериев) оптимальности проектных решений и области поиска значений параметров конструкций и режимов функционирования элементов технической системы на всех этапах ее проектирования.

В качестве критерия оптимальности решения задачи RF , то есть режима функционирования ТС, определяемого значениями размеров партий продуктов w_i , $i = 1, \dots, I$, моментов начала и окончания l -й операции k -го цикла работы аппаратов стадии j ХТС при выпуске i -го продукта tos_{ijkl}, tof_{ijkl} , $i = 1, \dots, I$, $j \in J_i$, $k = 1, \dots, K_{ij}$, $l = 1, \dots, L_{ijk}$, предложено использовать нижнюю оценку стоимости энергоресурсов различных видов (электричество, тепло, холод), потребляемых при реализации операций переработки партий продуктов в течение периода эксплуатации Tr [9]:

$$Ze = \sum_{i=1}^I w_i c_i \sum_{j \in J_i} \frac{p_{ij}}{r_{ij}} \sum_{k=1}^{K_{ij}} \sum_{l=1}^{L_{ijk}} \sum_{ke=1}^{K_e} C^{ke} en_{ijl}^{ke} g_{oc_{ijkl}} (tof_{ijkl} - tos_{ijkl}), \quad (1)$$

где C^{ke} – стоимость единицы (1 Дж) энергоресурса вида ke ;
 $p_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } p_{ij} = 0 \\ 1,05 n_{ij}, & \text{если } p_{ij} = 1 \end{cases}$ – коэффициент увеличения затрат энергии на j -й стадии

ТС при синхронной обработке равных долей партии i -го продукта в нескольких параллельных аппаратах (за счет увеличения потерь), p_{ij} – указатель способа обработки партий i -го продукта аппаратами стадии j ХТС ($p_{ij} = 1$ – синхронная обработка $1/n_j$ доли партии в каждом аппарате, $p_{ij} = 0$ – обработка партий целиком в порядке поступления); r_{ij} – коэффициент изменения размера партии i -го продук-

та на стадии j ХТС; goc_{ijk} – материальный индекс l -й операции k -го цикла работы аппаратов стадии j ТС при выпуске i -го продукта, кг/т; en_{ijl}^{ke} – удельный расход, Вт/кг, энергоресурса вида ke при реализации этой операции.

В качестве критерия оптимальности решения каждой из задач AO_{sj} предложено использовать ориентировочную стоимость выбранных основных аппаратов конкретной стадии. Стадии ХТС МХП, как правило, комплектуются стандартными аппаратами, стоимость которых можно определить по прейскурантам цен на оборудование, выпускаемое предприятиями химического машиностроения. Для приблизительной оценки стоимости оборудования предлагается использовать функциональные зависимости цены аппарата от его типа (ta_j) и определяющего размера

$$s(ta_j, X_j) = \alpha_j X_j^{\beta_j}, \quad j = 1, \dots, J,$$

где $\alpha_j = \alpha_j(ta_j)$, $\beta_j = \beta_j(ta_j)$ – коэффициенты, определяемые методами регрессионного анализа на основе имеющейся информации о ценах на аппараты различных типов, например, для стальных эмалированных емкостных аппаратов с цилиндрическими рубашками, сальниковыми уплотнениями и механическими перемешивающими устройствами, включая мотор-редукторы, $s(ta_j, X_j) = 94,643X_j^{0,368}$. С применением подобных зависимостей капитальные затраты на основное технологическое оборудование стадии j ХТС МХП можно оценить по формуле

$$Z_j = N_j s(ta_j, X_j),$$

а для обеспечения совместимости критериев оптимальности решений задач VA_j и задачи RF в качестве целевой функции задачи выбора АО стадии j ХТС используется сумма амортизационных отчислений от стоимости оборудования стадии за период выпуска продуктов в плановых объемах

$$Zk_j = Ek(Tp/Ty)(N_j s(ta_j, X_j)), \quad (2)$$

где Ek – нормативный коэффициент окупаемости для оборудования (0,15); Ty – годовой эффективный фонд рабочего времени ХТС, ч, с учетом сменности ее работы и продолжительностей переходов с выпуска одних продуктов на другие согласно календарному плану.

В качестве критерия оптимальности решения одной из задач OA_{jf} : оптимизации параметров конструкции и режима функционирования механического перемешивающего устройства вертикального емкостного аппарата предлагается использовать минимум дисперсии суммарной длины вектора скорости перемешиваемой среды, характеризующей степень равномерности поля скоростей в объеме аппарата:

$$K_{SVS} = \frac{1}{z} \sum_{i=1}^z (\bar{u}_i - \bar{u}_{cp})^2, \quad (3)$$

где $\bar{u}_i = \sqrt{\bar{u}_{li}^2 + \bar{u}_{ri}^2}$ – суммарная длина вектора скорости, м/с; $\bar{u}_{cp} = \frac{1}{z} \sum_{i=1}^z \sqrt{\bar{u}_{li}^2 + \bar{u}_{ri}^2}$ –

среднее значение суммарной длины вектора скорости, м/с; $\bar{u}_{li}, \bar{u}_{ri}$ – осредненные по Рейнольдсу значения составляющих вектора скорости для i -го узла конечно-элементной расчетной модели, м/с; l – текущее значение уровня жидкости в аппарате, м; r – текущее значение радиуса аппарата, м; z – общее число узлов конечно-элементной расчетной модели.

В случаях, когда локальные задачи полностью независимы друг от друга, например задачи VA_j , $j = 1, \dots, J$, их следует решать с применением технологий параллельных вычислений [10].

Принцип проектируемости

Принцип проектируемости – формирование и предварительная проверка выполнения условий разрешимости задач проектирования (чаще всего, необходимых). Например, комплекс условий существования решений задачи RF и задач VA_j , используемый для определения прогнозных значений n_{ij}, r_{ij}, p_{ij} , $i = \overline{1, I}, j \in J_i$, необходимых для первоначального решения задачи RF , включает:

– условие возможности обработки партий каждого из продуктов в основных аппаратах всех стадий ХТС

$$\min_{j=1, \dots, J} (w_{ij}) \leq \max_{j=1, \dots, J} (w_{ij}), \quad i = \overline{1, \dots, I}, \quad (4)$$

где w_{ij} – возможные значения размера партии i -го продукта при их обработке в аппаратах стадии j , определяемые по результатам вычислений нижних $X_j^{\min}$ и верхних $X_j^{\max}$ оценок определяющих размеров основных аппаратов стадий ХТС, а также верхних оценок длительностей переработки партий продуктов τ_{ij}^* на стадиях $j \in J_{Si}$ (рис. 4);

– условие существования хотя бы одного основного аппарата, размер которого позволяет обрабатывать партии всех продуктов, для каждой из стадий ХТС (рис. 5)

$$[X_j^L, X_j^U] \cap XS_j \neq \emptyset, \quad j = \overline{1, J}, \quad (5)$$

где X_j^L, X_j^U – соответственно минимальное и максимальное допустимые значения определяющего размера основных аппаратов стадии j , вычисленные с использованием значений $w_i^{\min} = \min_{j=1, \dots, J} (w_{ij})$ и $w_i^{\max} = \max_{j=1, \dots, J} (w_{ij})$; XS_j – множества размеров стандартных основных аппаратов, пригодных для установки на стадиях ХТС (формируются предварительно на основе каталогов оборудования и прайс-листов, сведений о резервном оборудовании действующего производства);

– условие обеспечения требуемой производительности ХТС

$$\sum_{i=1}^I \frac{Q_i T_{C_{*i}}}{\max_{j=1, \dots, J} (w_{ij})} \leq T_p, \quad (6)$$

то есть возможности выпуска всех продуктов в объемах Q_i за время T_p .

К числу условий разрешимости задачи оптимизации параметров конструкции и режима функционирования механического перемешивающего устройства вертикального емкостного аппарата можно отнести:

– ограничение на значение отношения внутреннего диаметра аппарата к диаметру мешалки

$$Gd_* \leq \frac{D_r}{D_m} \leq Gd^*, \quad (7)$$

где интервал допустимых значений $[Gd_*, Gd^*]$ определяется типом мешалки, например для двухлопастной $Gd_* = 1,5$, $Gd^* = 2,5$;

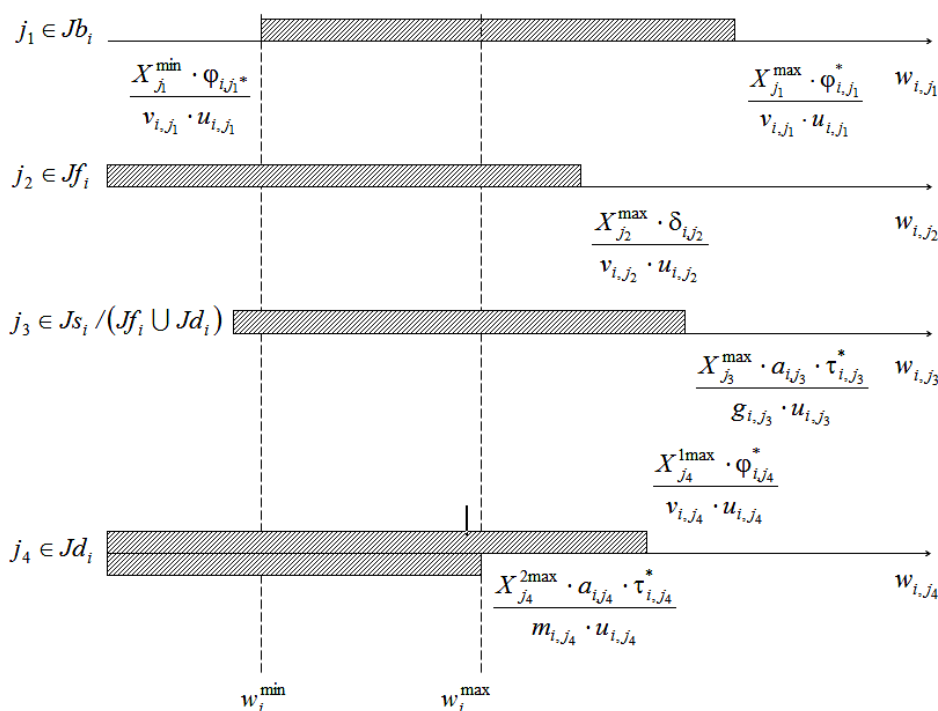


Рис. 4. Иллюстрация к условию (4) для i -го продукта:

Jb_i , Jf_i , Jd_i – множества номеров стадий выпуска i -го продукта, основными аппаратами которых являются емкости с перемешивающими устройствами и без них, рамными или камерными фильтр-прессами, роторными вакуумными сушилками соответственно; φ_{ij}^* , φ_{ij}^* – граничные значения степени заполнения аппарата стадии j при выпуске i -го продукта; g_{ij} , v_{ij} , m_{ij} – соответственно основной, объемный и массовый материалы индексы стадии j при выпуске i -го продукта, кг/т, м³/т, м³/с; a_{ij} – удельная производительность аппарата стадии $j \in Js_i$, кг/(м²·с), м³/(м²·с), м³/(м³·с); u_{ij} – доля партии (или число партий) i -го продукта, перерабатываемая в одном основном аппарате стадии j

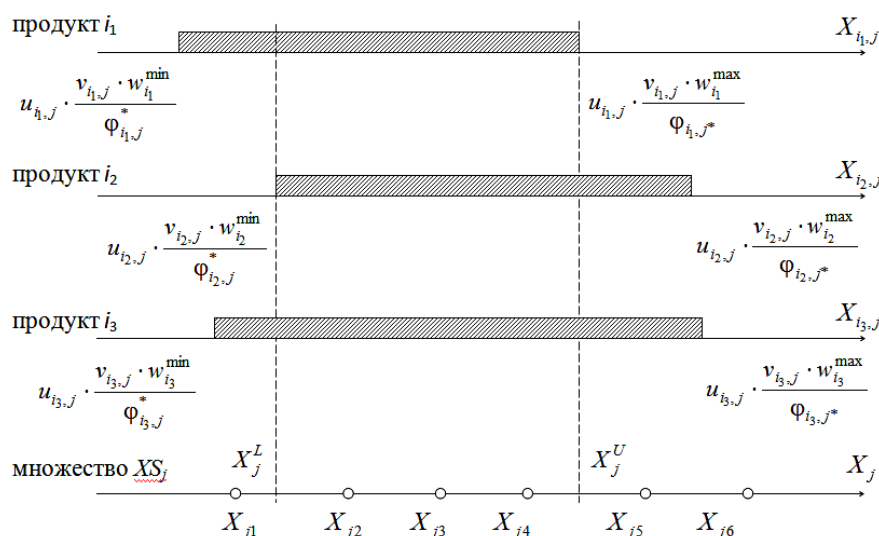


Рис. 5. Иллюстрация к условию (5):

для стадии $j \in Jb_i$, $i = i_1, i_2, i_3: [X_j^L, X_j^U] \cap XS_j = \{X_{j2}, X_{j3}, X_{j4}\}$

– ограничение на мощность привода аппарата

$$P_{\text{дв}} \leq 1,1P_{\text{max}}, \quad (8)$$

где P_{max} – допустимое значение мощности, при котором на каждый м^3 объема аппарата приходится 1 кВт мощности двигателя МПУ (из практического опыта эксплуатации вертикальных емкостных аппаратов).

Заключение

Таким образом, при автоматизированном проектировании технологического оборудования многоассортиментных химических производств рекомендуется руководствоваться принципами декомпозиции общей задачи проектирования, моделирования проектных решений с ориентацией на формирование полей определяемых параметров, оптимальности проектных решений и проектируемости. Их применение обеспечило успешное выполнение следующих научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ:

– разработку методики определения аппаратурного оформления химико-технологических систем многоассортиментных химических производств и ее применение для расчетов оборудования промышленных производств синтетических красителей и полупродуктов по заказам АО «Пигмент» (Тамбов);

– разработку методики определения конструкции и режима функционирования систем нагрева гидравлических прессов для термообработки резинотехнических изделий, изделий из пластмасс, металлов и сплавов, основанной на компьютерном моделировании процессов разогрева, стабилизации температуры и охлаждения нагревательных плит и изделий с применением системы конечно-элементного анализа ANSYS, и ее использование для реализации проектов АО «Завод Тамбовполимермаш».

Список литературы

1. Малыгин, Е. Н. Методология автоматизированного проектирования технических систем с изменяемым ассортиментом продукции / Е. Н. Малыгин, С. В. Карпушкин // Вест. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, №4. – С. 778 – 788.
2. Parageorgaki, S. Optimal Design of Multipurpose Batch Processes. 2. A Decomposition Solution Strategy / S. Parageorgaki, G. V. Reklaitis // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 1990. – Vol. 29. – P. 2062 – 2073. doi: 10.1021/IE00106A014
3. Декомпозиционный алгоритм оптимизации многопродуктовых химико-технологических систем / Л. С. Гордеев, В. В. Макаров, Ю. В. Сбоева [и др.] // Программные продукты и системы. – 1997. – № 1. – С. 2 – 10.
4. Pinto, T. Decomposition Based Algorithm for the Design and Scheduling of Multipurpose Batch Plants / T. Pinto, A. Barbósa-Póvoa, A. Novais // Poster papers of 16th European Symp. on Computer Aided Process Engineering. – Garmisch-Partenkirchen, Germany. – 2006. – Vol. 21. – P. 1051 – 1056. doi: 10.1016/S1570-7946(06)80185-9
5. Мокрозуб, В. Г. Системный анализ процессов принятия решений при разработке технологического оборудования / В. Г. Мокрозуб, Е. Н. Малыгин, С. В. Карпушкин // Вест. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 3. – С. 364 – 373. doi: 10.17277/vestnik.2017.03.pp.364-373
6. Мартянов, Е. И. Оптимизация процесса перемешивания жидкости в вертикальных емкостных аппаратах с механическими перемешивающими устройствами / Е. И. Мартянов, С. В. Карпушкин // Вест. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2023. – Т. 29, № 2. – С. 280 – 293. doi: 10.17277/vestnik.2023.02.pp.280-293

7. Open FOAM – открытая интегрируемая платформа для численного моделирования задач механики сплошных сред. – Текст : электрон. – URL : <http://fsweb.info/caecad/openfoam.html> (дата обращения: 10.03.2024).

8. Руководящий нормативный документ РД 26-01-90-85: Механические перемешивающие устройства, метод расчета. – Введ. с 01.01.1986. – Л. : РТП ЛенНИИхиммаша, 1985. – 257 с.

9. Карпушкин, С. В. Методика оценки эффективности аппаратного оформления химико-технологических систем многоассортиментного производства / С. В. Карпушкин, М. Н. Краснянский, А. Б. Борисенко // Информационные системы и технологии. – 2011. – № 5. – С. 96 – 106.

10. Борисенко, А. Б. Применение OpenMP для оптимального выбора аппаратного оформления многоассортиментных производств / А. Б. Борисенко, С. В. Карпушкин // Вычислительные технологии. – 2015. – Т. 20, № 4. – С. 17 – 28.

Principles of Computer-Aided Design of Process Equipment for Multi-Product Chemical Industries

S. V. Karpushkin✉, M. N. Krasnyanskiy

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

Keywords: automated design; multi-product chemical industry; principles of decomposition, modeling, optimality and designability; process equipment.

Abstract: The paper presents the principles which are recommended to be used in automated design of process equipment for multi-product chemical production: decomposition of general design problem into a number of interrelated subtasks, modeling of design solutions with orientation to the formation of fields of defined parameters, optimality of design solutions and designability. The principles are illustrated through the example of the problem of determining the hardware design of the chemical industrial system of the designed multi-product chemical industry.

References

1. Malygin Ye.N., Karpushkin S.V. [Methodology of automated design of technical systems with variable product range], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2008, vol. 14, no. 4, pp. 778-788. (In Russ., abstract in Eng.)

2. Parageorgaki S., Reklaitis G.V. Optimal Design of Multipurpose Batch Processes. 2. A Decomposition Solution Strategy, *Ind. & Eng. Chem. Res.*, 1990, vol. 29, pp. 2062-2073. doi: 10.1021/IE00106A014

3. Gordeyev L.S., Makarov V.V., Sboyeva Yu.V. [et al.] [Decomposition algorithm for optimization of multi-product chemical-engineering systems], *Programmnyye produkty i sistemy* [Software products and systems], 1997, no. 1, pp. 2-10. (In Russ., abstract in Eng.)

4. Pinto T., Barbósa-Póvoa A., Novais A. Decomposition Based Algorithm for the Design and Scheduling of Multipurpose Batch Plants. *Poster papers of 16th European Symp. on Computer Aided Process Engineering*, Garmisch-Partenkirchen, Germany, 2006, pp. 1051-1056. doi: 10.1016/S1570-7946(06)80185-9

5. Mokrozub V.G., Malygin Ye.N., Karpushkin S.V. [Systems 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. (In Russ., abstract in Eng.)

6. Mart'yanov Ye.I., Karpushkin S.V. [Optimization of the liquid mixing process in vertical tank apparatuses with mechanical mixing devices], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2023, vol. 29, no. 2, pp. 280-293. doi: 10.17277/vestnik.2023.02.pp.280-293 (In Russ., abstract in Eng.)

7. Available at: <http://fsweb.info/caecad/openfoam.html> (accessed 10 March 2024).

8. RD 26-01-90-85. *Mekhanicheskiye peremeshivayushchiye ustroystva, metod rascheta* [Mechanical mixing devices, calculation method], Leningrad: RTP LenNIIkhimmasha, 1985. 257 p. (In Russ.)

9. Karpushkin S.V., Krasnyanskiy M.N., Borisenko A.B. [Methodology for assessing the efficiency of hardware design of chemical-technological systems for multi-product production], *Informatsionnyye sistemy i tekhnologii* [Information systems and technologies], 2011, no. 5, pp. 96-106. (In Russ., abstract in Eng.)

10. Borisenko A.B., Karpushkin S.V. [Application of OpenMP for optimal selection of hardware design of multi-product production], *Vychislitel'nyye tekhnologii* [Computing technologies], 2015, vol. 20, no. 4, pp. 17-28. (In Russ., abstract in Eng.)

Prinzipien des computergestützten Designs der technologischen Ausrüstung der Multisortiment-chemischen Produktion

Zusammenfassung: Der Beitrag stellt die Prinzipien vor, die bei der automatisierten Projektierung von technologischen Anlagen für die chemische Mehrsortimentsproduktion zu befolgen sind: Zerlegung des allgemeinen Projektierungsproblems in eine Reihe von zusammenhängenden Teilaufgaben, Modellierung von Projektierungslösungen mit Orientierung auf die Bildung von Feldern bestimmter Parameter, Optimalität von Projektierungslösungen und Projektierbarkeit. Die Prinzipien sind am Beispiel des Problems der Bestimmung des Hardware-Designs des chemisch-technologischen Systems der geplanten Mehrsortiment-Chemieproduktion illustriert.

Principes de conception assistée par ordinateur de l'équipement technologique de la production chimique multi-gamme

Résumé: Sont présentés les principes qui sont recommandés pour guider la conception automatisée de l'équipement technologique des productions chimiques multi-gammes: la décomposition de la tâche de conception globale en un certain nombre de sous-tâches interconnectées, la modélisation des solutions de conception axées sur la formation de champs de paramètres définis, l'optimalité des solutions de conception et la constructibilité. Les principes sont illustrés à l'exemple de la tâche de la détermination de la conception matérielle du système chimique et technologique de la production chimique multi-gamme projetée.

Автор: Карпушкин Сергей Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; **Краснянский Михаил Николаевич** – доктор технических наук, профессор, ректор, ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВИБРАЦИИ НА ПРОЦЕСС МАССООБМЕНА В НАСАДОЧНОЙ ЭКСТРАКЦИОННОЙ КОЛОННЕ

А. Б. Голованчиков, О. А. Залипаева✉, Н. А. Меренцов, Ю. Н. Раева

*Кафедра «Процессы и аппараты химических и пищевых производств»,
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»,
zalipaevaolga@yandex.ru; Волгоград, Россия*

Ключевые слова: амплитуда и частота вибрации; высота и объем насадки; диаметр колонны; коэффициент массоотдачи; насадочная колонна; расход экстрагента; скорость движения капель; эквивалентный диаметр капель; экстракция.

Аннотация: Проведено физическое и математическое моделирование процесса жидкостной экстракции с учетом влияния вибрации на уменьшение толщины пограничных слоев сплошной фазы очищаемой жидкости и капель экстрагента около их поверхности. Это влияние в типовом алгоритме расчета учитывается в уравнениях относительной скорости движения капель, движущихся противотоком в сплошной фазе очищаемой жидкости, а также в формуле зависимости эквивалентного диаметра капель от скорости вибрации, равной произведению круговой частоты на амплитуду. Приведены сравнительные расчеты экстракционной очистки трехкомпонентного раствора «вода – толуол – бензол» в насадочной колонне при типовом и модифицированном (с учетом вибрации) алгоритмах, показывающие увеличение коэффициентов массоотдачи и массопередачи и приводящие к снижению объема насадки и оптимального расхода экстрагента.

Введение

Для интенсификации экстракционных процессов, уменьшения расхода экстрагента и снижения геометрических размеров колонн с середины прошлого века начали использовать вибрацию самих аппаратов при небольших их размерах и массах, либо отдельных узлов, либо пульсацию сплошной или дисперсной фаз на входе, либо пульсацию обеих фаз внутри аппаратов [1, 2]. Вибрацию в настоящее время широко применяют для разделения и смешивания различных сред [3 – 5].

В справочнике [6] показано, что применение вибрации приводит к увеличению поверхности дисперсной фазы за счет уменьшения среднего размера капель и снижению диффузионного сопротивления на границе. Для экстракции в системах «жидкость – жидкость» автор монографии [7] рекомендует использовать цилиндрические излучатели с частотой колебаний от 8 до 18 кГц и мощностью от 2,5 до 4,5 кВт. Скорость образования капель при этом возрастает в 2–3 раза. Это приводит к снижению высоты экстракционной колонны, но общий эффект увеличения массообмена за счет удельной мощности вибрации

$$J = (2\pi f)^3 A^2,$$

характеризующей мощность вибрации на единицу колеблющейся массы, Вт/кг, в случае экстракции уксусной кислоты водой из метилизобутилкетона удается

повысить всего на 13 – 15 %, то есть для системы экстракции «жидкость – жидкость» не мощность вибрации определяет общую эффективность данного массообменного процесса. В этой же работе показано, что для процессов выщелачивания в системе «твердое тело – жидкость» скорость процесса можно увеличить до 10 раз, что объясняется резким снижением диффузионного сопротивления в капиллярах твердой пористой частицы.

Рекомендации по технологическим режимам и геометрическим размерам виброэкстракционных аппаратов приведены в монографии [8]. Авторы рекомендуют амплитуду колебаний $A = 3...4$ мм, частоту вибрации 20 Гц, а сами исследования проводились на амплитудах $A = 0,8...5$ мм и частотах $f = 15...50$ Гц. Но эксперименты проводились на пустотелом аппарате с перфорированными дисковыми тарелками с отношением их диаметров $D_T/D_A = 0,35...0,45$ и отношением высоты жидкости к диаметру аппарата $H/D_A = 1,4...1,5$ с электромагнитными вибраторами, совершающими возвратно поступательное движение вала с тарелками внутри экстрактора. Важно отметить увеличение производительности в 5–6 раз по сравнению с аппаратом с лопастной мешалкой и одновременное уменьшение затрат энергии в 2,2 раза. Аналогичный аппарат, но объемом 80 м^3 и диаметром 3,2 м, представлен в работе [9].

Большое внимание виброэкстракционным процессам уделено в монографии [10], где подробно дано описание колонных аппаратов с насадкой в виде дисков различной конструкции, защищенных авторами свидетельствами как нашей страны, так и патентами зарубежных стран. Приведены результаты работы промышленных вибрационных экстракторов с насадками тарельчатого типа и экспериментальных исследований на полупромышленной установке по очистке смазочных масел в колонне диаметром 0,5 м и высотой 5,3 м, при этом в нижней части высотой 1,5 м находились кольца Рашига $25 \times 25 \times 5$, а в верхней – шесть перфорированных дисков, совершающих колебания с амплитудой 12 мм при частоте 0,8 Гц. Но ничего не сказано об эффективности работы насадочной колонны в вибрационном режиме по сравнению с типовым режимом без вибрации, только приведены сравнения для виброэкстракторов с вибрирующими дисками и аппаратов с мешалками [11, 12].

Таким образом, литературных источников по физическому и математическому моделированию виброэкстракционных процессов в аппаратах, заполненных насадочными телами (кольцами Рашига и другими элементами), с количественными результатами этих теоретических исследований крайне мало.

Цель работы – физическое и математическое моделирование виброэкстракционного процесса массопередачи в насадочной колонне и оценка влияния параметров вибрации – амплитуды и частоты, на технологические параметры и геометрические размеры самой колонны.

Расчет экстракционной насадочной колонны, работающей в стандартном режиме (без вибрации) и с вибрацией

В физической модели за основу взяты экспериментальные и теоретические исследования, связанные с уменьшением толщины диффузионных пограничных слоев на поверхности сплошной жидкой фазы и дисперсной фазы – капель эмульсии.

В монографиях, учебниках и статьях представлены результаты экспериментальных исследований и полученные критериальные уравнения, учитывающие влияние скоростей движения фаз в массообменных процессах на коэффициенты массоотдачи и массопередачи, и связанные с ними геометрические размеры аппаратов, в том числе насадочных экстракторов [13 – 19]. При физическом моделировании увеличение коэффициентов массоотдачи связано с уменьшением толщины

пограничных слоев сплошной и дисперсной фаз, в частном рассматриваемом случае на границе капли (рис. 1) с ростом числа Рейнольдса, как определяющего критерия, и соответственно с увеличением числа Нуссельта диффузионного (или Шервуда) в критериальных уравнениях [20].

Ниже приводится фрагмент алгоритма расчета насадочной экстракционной колонны с формулами, учитывающими скорость вибрации, определяемую произведением $2\pi fA$. В таблице 1 приведены исходные и справочные данные для расчета экстракционной насадочной колонны, работающей в штатном режиме без вибрации и с вибрацией.

1. Скорость каплей относительно сплошной фазы очищаемого раствора с учетом вибрации

$$\omega'_o = \sqrt{\omega_o^2 + (2\pi f A)^2} . \tag{1}$$

2. Удерживающая способность по каплям дисперсной фазы

$$F_y = (1 + \omega_d / \omega'_o - \omega_c / \omega'_o) / 2 . \tag{2}$$

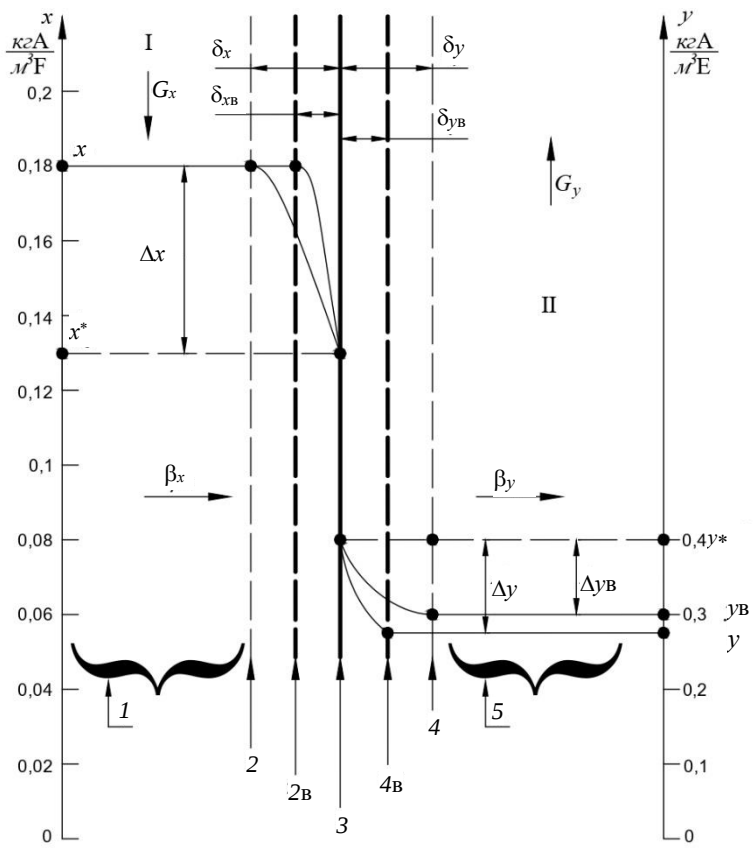


Рис. 1. Изменение средних концентраций извлекаемого компонента из сплошной фазы – очищаемого раствора (I) и в каплях экстрагента (II):
 1 – ядро потока сплошной фазы очищаемого раствора; 2 – пограничный слой со стороны сплошной фазы; 3 – граница раздела фаз (поверхность капли); 4 – пограничный слой со стороны дисперсной фазы в экстрагенте; 5 – ядро капли экстрагента
 (в – виброэкстракционный процесс, --- – пограничный слой в режиме без вибрации; ---- с вибрацией)

Таблица 1

Исходные и справочные данные для расчета экстракционной насадочной колонны, работающей в штатном режиме без вибрации и с вибрацией

Наименование параметра	Величина параметра в режиме	
	без вибрации	с вибрацией
Исходные данные		
Производительность по очищаемому раствору G_x , кг/ч	100	
Начальная концентрация извлекаемого компонента x_f , кг/М ³	0,3	
Конечная концентрация извлекаемого компонента x_r , кг/М ³	0,06	
Начальная концентрация извлекаемого компонента в экстрагенте y_s , кг/М ³	0,01	
Справочные данные		
Плотность очищаемого раствора ρ_x , кг/м ³	1000	
Плотность экстрагента ρ_y , кг/м ³	900	
Вязкость очищаемого раствора μ_x , Па·с	0,001	
Вязкость экстрагента μ_y , Па·с	0,00063	
Наружный диаметр колец Рашига $35 \times 35 \times 4 d_n$, м	0,038	
Порозность насадки ε , м ³ /м ³	0,72	
Толщина стенки колец Рашига δ , м	0,0044	
Коэффициент диффузии извлекаемого компонента в сплошной фазе D_x , м ² /м ³	1,05·10 ⁻⁹	
То же для экстрагента D_y , м ² /м ³	2·10 ⁻⁹	
Поверхностное натяжение капель в сплошной фазе очищаемой жидкости δ_p , Н/м	0,0341	
Константа равновесия m , кгY/кгX	2,22	
Масса вибрирующих узлов m_d , кг	—	40
Амплитуда колебаний A , м		5·10 ⁻⁴
Частота колебаний f , Гц		30

3. Диаметр капель дисперсной фазы

$$d_k = 0,92 \sqrt{\delta_p / g \Delta \rho} \omega'_o \varepsilon F_y / \left[\omega_d (1 - F_y) \right].$$
(3)
4. Число Рейнольдса при вибрации для очищаемого раствора

$$Re_x = \rho_x \omega'_o d_k / \mu_x.$$
(4)
5. Число Нуссельта диффузионного (Шервуда) для очищаемого раствора

$$Nu'_x = 50 + 0,0085 Re_x Pr_x^{0,7}.$$
(5)
6. Коэффициент массоотдачи для очищаемого раствора

$$\beta'_x = Nu'_x D_x / d_k.$$
(6)
7. Вспомогательный коэффициент для расчета коэффициента массоотдачи в каплях дисперсной фазы

$$K_{\beta y} = \rho_x^2 \delta_p^3 / (g \Delta \rho \mu_x^4).$$
(7)

8. Среднее время пребывания капель дисперсной фазы в насадке

$$\tau_y = F_y H_B / \omega_d . \quad (8)$$

9. Число Фурье для капель дисперсной фаз

$$Fo_y = 4D_y \tau_y / d_k^2 . \quad (9)$$

10. Число Нуссельта диффузионного (Шервуда) для капель дисперсной фазы

$$Nu'_y = (0,32 / Fo_y^{0,14}) Re_x^{0,68} K_{\beta y}^{0,1} . \quad (10)$$

11. Коэффициент массоотдачи для капель дисперсной фазы

$$\beta_y = Nu'_y D_y / d_k . \quad (11)$$

12. Коэффициент массопередачи с учетом вибрации

$$K_x = \frac{1}{1/\beta_x + 1/(m\beta_y)} . \quad (12)$$

13. Мощность вибропривода

$$N_{вп} = 1,2 \left[A^2 (2\pi f)^3 m_d \right] . \quad (13)$$

14. Общая мощность насосов и вибропривода

$$N_{об} = N_n + N_{вп} . \quad (14)$$

В таблице 2 приведены полученные расчетные параметры экстракционной насадочной колонны, работающей в стандартном режиме (без вибрации) и с вибрацией ($f = 30$ Гц, $A = 0,5$ мм).

Таблица 2

Расчетные параметры экстракционной насадочной колонны, работающей в стандартном режиме (без вибрации) и с вибрацией

Наименование параметра	Величина параметра в режиме	
	без вибрации	с вибрацией
1	2	3
Минимальный расход экстрагента G_{ym} , кг/ч	36,59	
Рабочий расход экстрагента G_y , кг/ч	46,23	43,56
Конечная концентрация извлекаемого компонента А в экстрагенте y_e , кгА/м ³	0,529	0,561
Равновесная концентрация компонента А очищаемой жидкости, соответствующая его начальной концентрации в очищаемом растворе x_c^* , кгА/м ³	0,666	
Удельная поверхность колец Рашига при упорядоченной укладке их в колонне σ , м ² /м ³	142	
Эквивалентный диаметр насадки – колец Рашига d_s , м	0,0203	
Абсолютное значение разности плотностей капель экстрагента и очищаемого раствора $\Delta\rho$, кгА/м ³	100	
Коэффициент избытка экстрагента $K_{и}$	1,264	1,191
Скорость захлебывания для очищаемого раствора (сплошная фаза) ω_z , м/с	0,0360	0,0355

Продолжение табл. 2

1	2	3
Рабочая фиктивная скорость очищаемого раствора ω_p , м/с	0,027	0,0266
Диаметр колонны (расчетный) D_p , м	1,144	1,154
Стандартный диаметр колонны D_A , м	1,2	
Фиктивная скорость сплошной фазы в стандартной колонне ω_c , м/с	0,0246	
Число единиц переноса по концентрации компонента А в сплошной фазе (исходном растворе)	4,1	4,68
Относительная скорость капель дисперсной фазы – экстрагента ω_o , м/с	0,133	0,163
Фиктивная скорость капель дисперсной фазы – экстрагента ω_d , м/с	0,0136	0,0107
Отношение фиктивных скоростей сплошной и дисперсной фаз (очищаемого раствора и капель) b	0,462	0,436
Наибольшее значение удерживающей способности по каплям дисперсной фазы F_y , м ³ /м ³	0,107	0,072
Диаметр капель экстрагента d_k , м	0,0055	0,0051
Число Рейнольдса для сплошной фазы – очищаемого раствора Re_x	735,3	763,8
Число Прандтля для сплошной фазы Pt_x	952,4	
Коэффициент массоотдачи от сплошной фазы к поверхности капель β_x , м/с	$1,54 \cdot 10^{-4}$	$1,88 \cdot 10^{-4}$
Средняя движущая сила по сплошной фазе Δx_f , кгА/м ³ Е	0,0585	0,0513
Площадь сечения стандартной колонны S_k , м ²	1,13	1,54
Высота насадки в колонне (расчетная) H_b , м	6,074	5,75
Время пребывания сплошной фазы (очищаемого раствора) в колонне τ_b , с	247,2	233,9
Число Нуссельта диффузионное: по дисперсной фазе Nu_y	589	650
по сплошной фазе Nu_x	810	905,2
Коэффициент массоотдачи от поверхности капли внутрь β_y , м/с	$2,14 \cdot 10^{-4}$	$2,57 \cdot 10^{-4}$
Коэффициент массопередачи от сплошной фазы (очищаемого раствора) к каплям дисперсной фазы (экстрагента) K_x , кгА/м ² с	$1,16 \cdot 10^{-4}$	$1,41 \cdot 10^{-4}$
Объем насадки в колонне V_b , м ³	6,245	6,04
Доля затрат электроэнергии в общих годовых затратах $O_{эл}$, %	13,23	17,85
Общая годовая стоимость эксплуатации колонны $S_{об}$, р./год	65237	65188
Затраты мощности насосов и вибраторов N_n , Вт	199,8	189,1
Затраты на вибропривод $N_{вп}$, Вт	0	80,2
Доля капитальных затрат O_k , %	17,04	16,4

Заключение

При одинаковых годовых затратах на эксплуатацию насадочной экстракционной колонны в типовом режиме работы (без вибрации) и с вибрацией (частота колебаний $f = 30$ Гц, амплитуда $A = 0,5$ мм) оптимальное значение коэффициента избытка экстрагента $K_{\text{и}}$ снижается с 1,264 до 1,191, а расход экстрагента (при производительности по сплошной фазе $G_{\text{х}} = 100$ кг/ч) уменьшается с 46,25 до 43,56 кг/ч. Годовая экономия расхода экстрагента составляет 19,37 т/год.

Вибрация увеличивает относительную скорость капель дисперсной фазы относительно потока сплошной фазы ω_0 с 0,133 до 0,163 м/с, то есть на 22,5 %, и уменьшает эквивалентный диаметр капель $d_{\text{к}}$ с 5,5 до 5,1 мм. Это увеличение скорости уменьшает толщину пограничных слоев около поверхности капель, увеличивает общую поверхность капель и способствует возрастанию коэффициентов массоотдачи. Коэффициент массопередачи $K_{\text{х}}$ при вибрации возрастает с $1,16 \cdot 10^{-4}$ до $1,41 \cdot 10^{-4}$ кг/м²с.

Объем насадки в колонне снижается незначительно, с величины 6,245 м³ до 6,04 м³, при этом стандартный диаметр колонны остается неизменным $D_{\text{А}} = 1,2$ м.

При выбранных параметрах вибрации – частоте $f = 30$ Гц и амплитуде $A = 0,5$ мм, мощности насосов и вибратора (при применении вибрации) и только мощности насосов без вибрации, практически одинаковые (190 и 200 Вт соответственно), то есть экономия энергии в годовом исчислении незначительна и составляет 72 кВт·ч за год. Таким образом, основное преимущество вибрации при эксплуатации насадочной экстракционной колонны связано в рассматриваемом случае с уменьшением расхода экстрагента на 5,8 % и объема насадки на 3,4 %. Увеличение амплитуды или частоты вибрации может привести к увеличению эффективности процесса экстракции, но вызовет резкое возрастание затрат энергии, которая увеличивается пропорционально квадрату амплитуды и кубу частоты колебаний вибропривода.

Список литературы

1. Задорский, В. М. Интенсификация газожидкостных процессов химической технологии / В. М. Задорский. – Киев : Техніка, 1979. – 198 с.
2. Федоткин, И. М. Физико-математические основы интенсификации процессов и аппаратов пищевой и химической технологии / И. М. Федоткин. – Кишинев : Штиинца, 1987. – 264 с.
3. Calculations of the Amplitude of Vibrations in Resonant and Near-Resonant Processes of a Vibrating Centrifugal Separator / A. B. Golovanchikov, O. A. Zalipaeva, N. A. Merentsov, Yu. N. Raeva // Optics and Spectroscopy. – 2023. – Vol. 131, Issue 12. – P. 1185 – 1189.
4. Пат. № 209700 Российская Федерация, МПК В01F31/00. Вибросмеситель / А. Б. Голованчиков, О. А. Залипаева, П. П. Залипаев, Н. В. Шибитова, Н. А. Меренцов, А. А. Шурак ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»; заявл. 08.07.2021 ; опублик. 18.03.2022, Бюл. № 8.
5. Влияние вибрации на технологические и геометрические параметры насадочной абсорбционной колонны / А. Б. Голованчиков, Н. А. Меренцов, В. И. Чурикова, П. П. Залипаев // Экологические системы и приборы. – 2024. – № 3. – С. 14 – 21.
6. Тимонин, А. С. Инженерно-экологический справочник / А. С. Тимонин. – Калуга : Изд-во Н.Ф. Бочкаревой, 2003. – Т. 1. – 884 с.

7. Новицкий, Б. Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах / Б. Г. Новицкий. – М. : Химия, 1983. – 192 с.
8. Ворсанофьев, В. Д. Вибрационная техника в химической промышленности / В. Д. Ворсанофьев, Э. Э. Кольман-Иванов. – М. : Химия, 1985. – 240 с.
9. Филин, В. Л. Развитие техники перемешивания жидких сред / В. Л. Филин. – М. : ЦИНТИХимнефтемаш, 1980. – 26 с.
10. Вибрационные массообменные аппараты / И. Я. Городецкий, А. А. Васин, В. М. Олевский, П. А. Луганов ; под общ. ред. В. М. Олевского. – М. : Химия, 1980. – 192 с.
11. Контактные насадки промышленных тепломассообменных аппаратов : монография / А. М. Каган, А. Г. Лаптев, А. С. Пушнов, М. И. Фарахов ; под ред. А. Г. Лаптева. – Казань : Отечество, 2013. – 454 с.
12. Сокол, Б. А. Насадки массообменных колонн : монография / Б. А. Сокол, А. К. Чернышев, Д. А. Баранов. – М. : Галилея-принт, 2009. – 358 с.
13. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии : учеб. для вузов / А. Г. Касаткин. – 14-е изд., стер. – М. : Альянс, 2008. – 750 с.
14. Дытнерский, Ю. И. Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проектированию / под ред. Ю. И. Дытнерского. – 4-е изд., стер. – М. : Альянс, 2008. – 494 с.
15. Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химических технологий / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков. – 10-е изд., перераб. и доп. – М. : Альянс, 2013. – 576 с.
16. Тимонин, А. С. Основы конструирования и расчета химико-технологического и природоохранного оборудования : справочник / А. С. Тимонин. – Калуга : Изд-во Н. Бочкаревой, 2002. – Т. 2. – 1028 с.
17. Лаптев, А. Г. Математические модели и методы расчетов тепломассообменных и сепарационных процессов в двухфазных средах : монография / А. Г. Лаптев, М. М. Башаров, Е. А. Лаптев. – Казань : КТЭУ ; Старый Оскол : ТНТ, 2021. – 288 с.
18. Лаптев, А. Г. Эффективность тепломассообмена и разделения гетерогенных сред в аппаратах нефтегазохимического комплекса / А. Г. Лаптев, М. М. Башаров. – Казань : Центр инновационных технологий, 2016. – 344 с.
19. Основы жидкостной экстракции / Г. А. Ягодин [и др.] ; под ред. Г. А. Ягодина. – М. : Химия, 1981. – 400 с.
20. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ 2019611290. Программа для расчета насадочной экстракционной колонны с учетом продольной диффузии / А. Б. Голованчиков, Н. А. Прохоренко, Н. А. Меренцов, К. В. Черикова; правообладатель ФГБОУ ВПО «ВГТУ». – № 2019610017; заявл. 09.01.2019; зарег. 24.01.2019 Бюл. № 2.

Evaluation of Impact of Vibration on Mass Transfer Process in Packed Extractor Column

A. B. Golovanchikov, O. A. Zalipaeva✉, N. A. Merentsov, Yu. N. Raeva

*Department of Processes and Apparatuses of Chemical and Food Production,
Volgograd State Technical University, zalipaevalga@yandex.ru; Volgograd, Russia*

Keywords: vibration amplitude and frequency; packing height and volume; column diameter; mass transfer coefficient; packed column; extractant flow rate; droplet velocity; equivalent droplet diameter; extraction.

Abstract: Physical and mathematical modeling of the liquid extraction process is carried out taking into account the influence of vibration on the reduction in the thickness of the boundary layers of the continuous phase of the purified liquid and the extractant droplets near their surface. This influence in the standard calculation algorithm is taken into account in the equations of the relative velocity of droplets moving countercurrently in the continuous phase of the liquid being purified, as well as in the formula for the dependence of the equivalent diameter of droplets on the vibration velocity, which is equal to the product of the circular frequency and the amplitude. An example of comparative calculations of extraction purification of a three-component solution of “water-toluene-benzene” in a packed column is given using standard and modified (taking into account vibration) algorithms, showing an increase in the mass transfer and mass transfer coefficients and leading to a decrease in the volume of the packing and the optimal consumption of the extractant.

References

1. Zadorskij V.M. *Intensifikaciya gazozhidkostnykh processov khimicheskoy tekhnologii* [Intensification of gas-liquid processes in chemical engineering], Kiev: Tekhnika, 1979, 198 p. (In Russ.).
2. Fedotkin I.M. *Fiziko-matematicheskie osnovy intensifikatsii processov i apparatov pishchevoj i khimicheskoy tekhnologii* [Physical and mathematical foundations of intensification of processes and equipment for food and chemical technology], Kishinev: Shtiinca, 1987, 264 p. (In Russ.).
3. Golovanchikov A.B., Zalipaeva O.A., Merentsov N.A., Raeva Yu.N. Calculations of the Amplitude of Vibrations in Resonant and Near-Resonant Processes of a Vibrating Centrifugal Separator, *Optics and Spectroscopy*, 2023, vol. 131, issue 12, pp. 1185-1189.
4. Golovanchikov A.B., Zalipayeva O.A., ShishkinYe.V., Merentsov N.A., Prokhorenko N.A., Zalipayev P.P. *Vibrosmesitel'* [Vibrating mixer], Russian Federation, 2022, UM 209700 (In Russ.).
5. Golovanchikov A.B., Merencov N.A., Churikova V.I., Zalipaev P.P. [The influence of vibration on the technological and geometric parameters of a packed absorption column], *Ehkologicheskie sistemy i pribory* [Ecological systems and devices], 2024, no. 3, pp. 14-21 (In Russ., abstract in Eng.)
6. Timonin A.S. *Inzhenerno-ekhnologicheskij spravochnik* [Engineering and Ecological Handbook], Kaluga: Izdatel'stvo N.F. Bochkarevoj, 2003, 884 p. (In Russ.).
7. Novitskiy B.G. *Primeneniye akusticheskikh kolebaniy v khimiko-tekhnologicheskikh protsessakh* [Application of acoustic oscillations in chemical and technological processes], Moscow: Khimiya, 1983, 191 p. (In Russ.).
8. Vorsanof'yev V.D., Kol'man-Ivanov E.E. *Vibratsionnaya tekhnika v khimicheskoy promyshlennosti* [Vibration technique in the chemical industry], Moscow: Khimiya, 1985, 240 p. (In Russ.).
9. Filin V.L. *Razvitie tekhniki peremeshivaniya zhidkikh sred* [Development of liquid mixing technology], Moscow: CINTIKhimneftemash, 1980, 26 p. (In Russ.).
10. Gorodetskiy I.A., Vasin A.A., Olevskiy V.M. (Ed.), Lukanov P.A. *Vibratsionnyye massoobmennyye apparaty* [Vibratory mass transfer apparatus], Moscow: Khimiya, 1980, 190 p. (In Russ.).
11. Kagan A.M., Laptev A.G., Pushnov A.S., Farakhov M.I. *Kontaktnye nasadki promyshlennykh teplomassoobmennyykh apparatov* [Contact packings for industrial heat and mass transfer devices], Kazan': Otechestvo, 2013, 454 p. (In Russ.).
12. Sokol B.A., Chernyshev A.K., Baranov D.A. *Nasadki massoobmennyykh kolonn* [Packings for mass transfer columns], Moscow: Galileyaprint, 2009, 358 p. (In Russ.).

13. Kasatkin A.G. *Osnovnye process i apparaty khimicheskoy tekhnologii: uchebnik dlya vuzov* [Basic processes and apparatuses of chemical engineering], Moscow: Al'yans, 2008, 750 p. (In Russ.).
14. Dytnerskiy Yu.I. *Osnovnye process i apparaty khimicheskoy tekhnologii: posobie po proektirovaniyu* [Basic processes and apparatuses of chemical engineering], Moscow: Al'yans, 2008. 494 p. (In Russ.).
15. Pavlov K.F., Romankov P.G., Noskov A.A. *Primery i zadachi po kursu processov i apparatov khimicheskikh tekhnologij* [Examples and tasks for the course of processes and apparatuses of chemical technologies], Moscow: Al'yans, 2013. 576 p. (In Russ.).
16. Timonin A.S. *Osnovy konstruirovaniya i rascheta khimiko-tekhnologicheskogo i prirodookhrannogo oborudovaniya* [Fundamentals of design and calculation of chemical-technological and environmental protection equipment], Kaluga: Izdatel'stvo N. Bochkarevoj, 2002, 1028 p. (In Russ.).
17. Laptev A.G., Basharov M.M., Laptev E.A. *Matematicheskie modeli i metody raschetov teplomassoobmennyykh i separacionnykh processov v dvukhfaznykh sredakh: monografiya* [Mathematical models and calculation methods for heat and mass transfer and separation processes in two-phase media], Kazan': KTEHU; Saryj Oskol: TNT, 2021, 288 p. (In Russ.).
18. Laptev A.G., Basharov M.M. *Ehffektivnost' teplomassoobmena i razdeleniya geterogennyykh sred v apparatakh neftegazokhimicheskogo kompleksa* [Efficiency of heat and mass transfer and separation of heterogeneous media in the apparatus of the oil and gas chemical complex], Kazan': Centr innovacionnykh tekhnologij, 2016, 344 p. (In Russ.).
19. Yagodin G.A. *Osnovy zhidkostnoj ehkstrakcii* [Basics of Liquid Extractio], Moscow: Khimiya, 1981, 400 p. (In Russ.).
20. Golovanchikov A.B., Prokhorenko N.A., Merentsov N.A., Cherkova K.V. *Programm. Programma dlya raschyota nasadochnoj ehkstrakcionnoj kolonny s uchyotom prodol'noj diffuzii* [Program for calculating a packed extraction column taking into account longitudinal diffusion], Russian Federation, 2019, Computer Program 2019611290 (In Russ.).

Bewertung des Einflusses von Vibrationen auf den Stofftransferprozess in der Aufsatz-Extraktionssäule

Zusammenfassung: Es ist eine physikalische und mathematische Modellierung der Flüssigkeitsextraktion durchgeführt, wobei der Einfluss von Vibrationen auf die Verringerung der Dicke der Grenzschichten der kontinuierlichen Phase der zu reinigenden Flüssigkeit und der Extraktionsmitteltröpfchen nahe ihrer Oberfläche berücksichtigt ist. Dieser Einfluss im typischen Berechnungsalgorithmus ist in den Gleichungen der relativen Geschwindigkeit von Tröpfchen berücksichtigt, die sich in der kontinuierlichen Phase der zu reinigenden Flüssigkeit im Gegenstrom bewegen, sowie in der Formel für die Abhängigkeit des äquivalenten Tropfdurchmessers von der Schwingungsgeschwindigkeit, die dem Produkt der Kreisfrequenz pro Amplitude entspricht. Vergleichende Berechnungen der Extraktionsreinigung der dreiteiligen Wasser-Toluol-Benzol-Lösung in der Aufsatzsäule sind bei typischen und modifizierten Algorithmen (unter Berücksichtigung von Vibrationen) angegeben, die die Erhöhung der Stoffübergangs- und Stoffaustauschkoeffizienten zeigen und zu einer Verringerung des Aufsatzvolumens und des optimalen Extraktionsverbrauchs führen.

Évaluation de l'impact des vibrations sur le processus d'échange de masse dans la colonne d'extraction de la buse

Résumé: Est réalisée une simulation physique et mathématique du processus d'extraction de liquide en tenant compte de l'effet des vibrations sur la réduction de la masse des couches limites de la phase solide du liquide purifié et des gouttelettes d'extragent près de leur surface. Cette influence dans l'algorithme de calcul type est prise en compte dans les équations de la vitesse relative des gouttelettes se déplaçant à contre-courant dans la phase continue du liquide purifié, ainsi que dans la formule de la dépendance du diamètre équivalent des gouttelettes à partir d'une vitesse de vibration égale à la production d'une fréquence circulaire par amplitude. Sont présentés les calculs comparatifs de la purification d'extraction de la solution à trois composants «eau – toluène – benzol» dans la colonne de buse avec des algorithmes typiques et modifiés (en tenant compte de la vibration), montrant une augmentation des coefficients de transfert de masse et entraînant une diminution du volume de la buse et du débit optimal.

Авторы: *Голованчиков Александр Борисович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств»; *Залипаева Ольга Александровна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств»; *Меренцов Николай Анатольевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств»; *Раева Юлия Николаевна* – магистрант, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», Волгоград, Россия.

ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКА ПРИ ЭКСТРУЗИИ ДЛИННОМЕРНЫХ ПРОФИЛЬНЫХ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК С ЗАДАНЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ КАЧЕСТВА

М. В. Соколов^{1✉}, П. С. Беляев², Д. В. Туляков³, К. В. Брянкин⁴

*Кафедры: «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении» (1),
msok68@mail.ru; «Материалы и технология» (2), «Химия и химические технологии» (4),
ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия;*

ТОГАПОУ «Тамбовский бизнес-колледж» (3), Тамбов, Россия

Ключевые слова: длинномерные профильные заготовки; показатели качества профильных изделий; резинотехнические изделия; ультразвуковой волновод; экструзионная формующая головка.

Аннотация: В целях улучшения и прогнозирования показателей качества длинномерных профильных резинотехнических заготовок проведены экспериментальные исследования по оценке эффективности применения ультразвукового воздействия с помощью волновода, установленного перпендикулярно (радиально) к потоку экструдированной резиновой смеси на выходе из материального цилиндра перед формующей головкой, что также способствует разработке новых способов в технологическом процессе вторичной переработки полимерных материалов, в том числе резиновой крошки.

Введение

Эффективность ультразвукового воздействия на различные технологические процессы подтверждена многочисленными исследованиями и опытом более чем тридцатилетнего применения ультразвуковых технологий на ряде предприятий различных отраслей промышленности, позволившими установить следующее. Под воздействием вибрации перестраиваются и разрушаются структурные связи во многих аморфных материалах, например, в полимерах, находящихся в вязкотекучем состоянии. При этом ускоряются механическая релаксация (тиксотропное снижение вязкости и упругости) и механодеструкция (частичное уменьшение молекулярной массы) макромолекул. В результате облегчается, например, виброформование полимеров (сокращается время переработки, снижаются рабочее давление и расход энергии), повышается качество изделий. При наложении на стационарную деформацию сдвига низкочастотных колебаний возникает эффект так называемой реологической нелинейности – увеличивается скорость течения полимерного материала (например, при вибропрессовании порошков и т.д.) [1, 2].

Применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности обеспечивает 10 – 1000-кратное ускорение процессов, протекающих между двумя или несколькими неоднородными средами (растворения, очистки, обезжиривания, дегазации, крашения, измельчения, пропитки, эмульгирования, экстрагирования, кристаллизации, полимеризации, предотвращения образования накипи, гомогенизации, эрозии, химических и электрохимических реакций и др.).

Использование ультразвуковых колебаний позволяет осуществлять технологические процессы, не реализуемые или сложно реализуемые традиционными методами – обеспечивать размерную обработку (сверление, снятие фасок, выпол-

нение пазов) хрупких и твердых материалов, таких как керамика, полупроводниковые материалы, стекло, самоцветы, ферриты, сверхтвердые сплавы и стали.

Ультразвуковые колебания позволяют интенсифицировать многие процессы, происходящие на границе контакта материалов (сварку полимерных материалов, склеивание), ускоряя технологические процессы и повышая качество получаемых изделий, а также разрабатывать новые технологические процессы и способы для вторичной переработки полимерных материалов, в том числе резиновой крошки [3].

Исследование эффективности применения ультразвука при экструзии профильных резинотехнических заготовок

В качестве объекта исследования принят неизотермический процесс экструзии резиновой смеси (шифр 46ПРФ-26) на экспериментальной установке (рис. 1) [2].

Параметры резиновой смеси 46ПРФ-26 и технологический режим процесса экструзии: температура цилиндра и шнека $T_{\text{ц}} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$; температура резиновой смеси на входе в винтовой канал $T_{\text{см. вх}} = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Эксперимент проводился следующим образом. Резиновая смесь 46ПРФ-26, приготовленная в центральной заводской лаборатории АО «Тамбовмаш» (ОАО «АРТИ-Завод», Тамбов), с известными свойствами резалась на ленты шириной 20 мм и наматывалась на загрузочный барабан экспериментальной установки. Далее установка в течение 30 мин разогревалась (выход на режим) и проводилась серия экспериментов, которые заключались в получении образцов

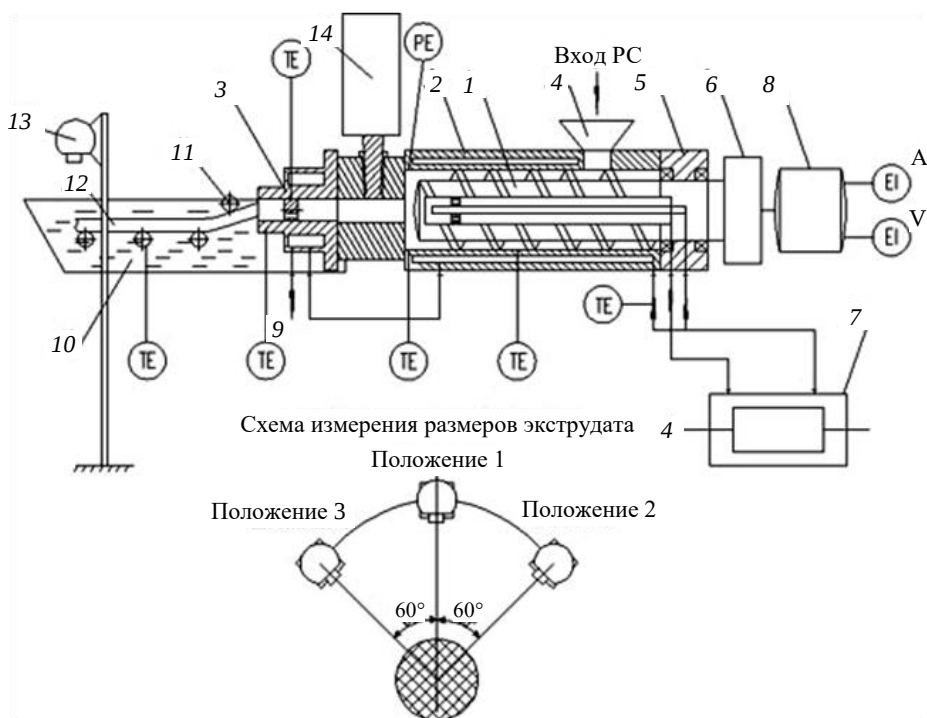


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования процессов экструзии под влиянием ультразвука:

1 – шнек; 2 – цилиндр; 3 – формующая головка; 4 – загрузочное устройство; 5 – опора шнека; 6 – редуктор; 7 – термостат; 8 – электродвигатель; 9 – дорнодержатель; 10 – ванна с теплоносителем; 11 – прижимные ролики; 12 – экструдат; 13 – цифровая фотокамера; 14 – ультразвуковой излучатель; ТЕ – датчики температуры; РЕ – датчик давления; А – амперметр; V – вольтметр

в течение 5, 10, 15 с фиксированной частотой вращения $\omega = (5; 10; 20; 30)$ об/мин для каждого диаметра мундштука $d = (8,4; 10,4; 18)$ мм. Также снимались следующие параметры: $T_{\text{см. вых}}$ – температура выхода экструдата, которая измерялась игольчатой термопарой, вмонтированной в формующую головку, °С; P – давление, которое снималось с датчика часового типа, деление; I – потребляемый ток, измеряемый с помощью амперметра, А; Q – производительность шнековой машины, получаемая взвешиванием каждого полученного образца [г/30 с] и переводом в [кг/ч]; ν – частота ультразвуковой установки, Гц. На выходе из оформляющего канала проводили измерение диаметра в нескольких определенных местах, после охлаждения образцов измерения диаметров сечения экструдата проводились в тех же точках, что позволило рассчитать относительное изменение диаметра образца до и после охлаждения. После этого физико-механические показатели и размеры образцов, полученные с применением ультразвука, сравнивались с теми же показателями образцов без воздействия ультразвука.

В процессе экспериментов выбирались различные технологические режимы экструзии и конструкции выходных каналов формующего инструмента в целях уменьшения значения относительного изменения поперечного сечения экструдата (отношение разности диаметров экструдата и мундштука к диаметру мундштука) до возможно минимального. Также варьировались значения рабочих температур в экструдере при частоте ультразвуковой установки 21 756 Гц и времени воздействия 5, 10, 15 с. В результате экспериментальных исследований получены зависимости, представленные на рис. 2, 3.

Выбраны такие технологические параметры и аппаратное оформление, которые придают длинномерным резинотехническим заготовкам (РТЗ) требуемые физико-механические показатели [4]. Для улучшения показателей качества, то есть физико-механических характеристик длинномерных РТЗ, выбран способ воздействия на материал ультразвуковыми волнами, что привело к уменьшению разбухания длинномерных профильных заготовок из резиновой смеси на выходе из экструдера при сохранении деформационных характеристик на уровне допустимых значений для данного продукта и улучшило триботехнические характеристики материалов. Рост напряжений в полимерной композиции при малых деформациях реализуется при непродолжительном воздействии ультразвука на нее, что открывает новые возможности применения данного метода в практических целях.

Методика экспериментальных исследований состоит в следующем. Необходимо определить такой режим экструзии и выбрать такую конструкцию формующего инструмента, чтобы в исследуемом материале «разбухание», то есть значение относительного изменения поперечного сечения экструдата (отношение разности диаметров экструдата и мундштука к диаметру мундштука), было минимальным. Для этого проведены предварительные эксперименты, которые заключались в том, чтобы выбрать несколько режимов работы экструдера (10, 20, 30 об/мин), затем исследования физико-механических характеристик без влияния ультразвука на резиновую смесь и после воздействия ультразвука. Опыты проводились на нескольких видах формующего инструмента (мундштуках). Результаты сравнивались со значениями, полученными без использования ультразвука.

Все данные экспериментальных исследований заносились в бланк исследований. Затем образцы экструдата исследовались в ЦЗЛ АО «Тамбовмаш» («АРТИ-Завод») для определения физико-механических показателей. Полученные данные по условной прочности при растяжении, пластичности, подвулканизации, вязкости по Муни, твердости образцов сравнивались с данными, полученными без влияния ультразвука при производстве заготовок. Физико-механические показатели остались на прежнем уровне.

Для определения оптимальных режимов переработки резиновой смеси с учетом изменения размеров экструдата получены следующие технологические зави-

симости от частоты вращения шнека: мощности N ; производительности Q ; давления P ; температуры выхода экструдата $T_{\text{вых}}$, а также зависимости относительного изменения диаметра экструдата до и после охлаждения $\delta_{\text{на вых}}$, $\delta_{\text{после охл}}$ от частоты вращения шнека и времени воздействия ультразвука, его частоты после процесса экструзии, и проведен сравнительный анализ их с эталоном (резиновая смесь до воздействия на нее ультразвуковых колебаний).

В результате проведенных экспериментов и анализа полученных данных построены графические зависимости от частоты вращения шнека при различных диаметрах мундштука d_m (см. рис. 2, 3). Производительность монотонно растет с увеличением частоты вращения шнека до 30 об/мин. (см. рис. 2, а). Минимальная потребляемая мощность под воздействием УЗ соответствует частоте вращения шнека 20 об/мин, а с увеличением частоты вращения до 30 об/мин мощность незначительно увеличивается. Расхождение между теоретическими и экспериментальными значениями составляет менее 10 %. (см. рис. 2, б).

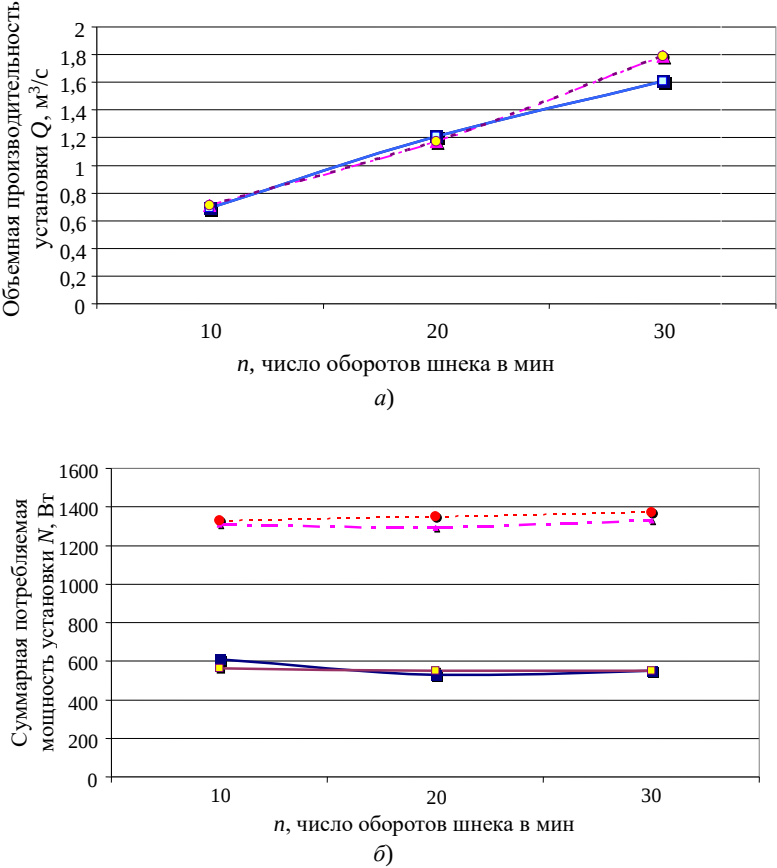


Рис. 2. Зависимости производительности экструдера Q (а) и суммарной потребляемой мощности экструдера N (б) без и с воздействием ультразвуковых колебаний от частоты вращения шнека n :

- без ультразвука при $d_m = 10,4$ мм, $l = 39$ мм;
- ▲— с применением ультразвука при $d_m = 10,4$ мм, $l = 39$ мм;
- без ультразвука при $d_m = 18$ мм, $l = 55$ мм;
- с применением ультразвука при $d_m = 18$ мм, $l = 55$ мм

С увеличением частоты вращения шнека происходит уменьшение $T_{\text{вых}}$ на выходе из формирующей головки. Это связано с уменьшением времени пребывания материала в перерабатывающих каналах (см. рис. 3, а).

Разбухание экструдата с ростом частоты вращения уменьшается в диапазоне 10...30 об/мин при отсутствии ультразвука и заметно уменьшается при наложении ультразвуковых колебаний на получаемый экструдат при числе оборотов до 20 об/мин, так как идет рост температуры от 50 °С при диаметрах мундштука 10,4 и 18 мм, следовательно, уменьшается вязкость, что приводит к уменьшению напряжений сдвига в диапазоне 20...30 об/мин (см. рис. 3, б).

Для выбора режима переработки прежде всего необходимо задаваться физико-механическими показателями. Расхождения с эталонными показателями (до воздействия ультразвука) составляют не более 10 %.

Исходя из вышеперечисленного для всех диаметров мундштука выбираем температуру цилиндра $T_{\text{ц}} = 50\text{ °С}$; частоту вращения шнека 20 об/мин, так как при больших частотах вращения шнека суммарная потребляемая мощность увеличивается. При этом относительное изменение диаметра экструдата будет минимальным.

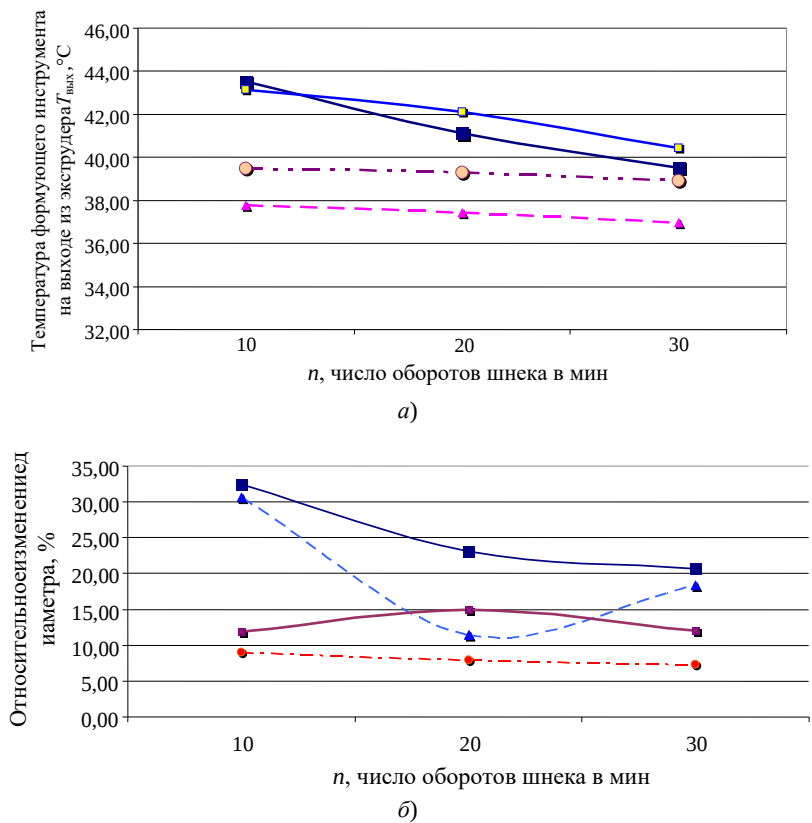


Рис. 3. Зависимости температуры формирующего инструмента на выходе из формирующей головки $T_{\text{вых}}$ (а) и относительного изменения диаметра δ до и после его охлаждения (б) от частоты вращения шнека n :

- без ультразвука при $d_m = 10,4\text{ мм}$, $l = 39\text{ мм}$;
- ▲— с применением ультразвука при $d_m = 10,4\text{ мм}$, $l = 39\text{ мм}$;
- без ультразвука при $d_m = 18\text{ мм}$, $l = 55\text{ мм}$;
- с применением ультразвука при $d_m = 18\text{ мм}$, $l = 55\text{ мм}$

Заключение

Так как использование ультразвука при производстве длинномерных профильных резинотехнических заготовок приводит к резкому снижению относительного изменения диаметра экструдата, но при этом увеличивается расход суммарной потребляемой мощности экструдера с учетом ультразвуковой установки, значит требуется технико-экономическое обоснование эффективности его применения для достижения следующих результатов: прогнозируемых и заданных показателей качества РТИ4 проектирования энергосберегающего оборудования; разработки технологического процесса и способов вторичной переработки полимерных материалов, в том числе резиновой крошки.

Список литературы

1. Басов, Н. И. Виброформование полимеров / Н. И. Басов, С. А. Любартович, В. А. Любартович. – Л. : Химия, 1979. – 160 с.
2. Методология расчета оборудования для производства длинномерных резинотехнических заготовок заданного качества / М. В. Соколов, А. С. Клинков, П. С. Беляев, В. К. Скуратов, В. Г. Однолько. – М. : Машиностроение, 2009. – 352 с.
3. Пат. 2 489 455 Российская Федерация, МПК C08J 11/00 (2006.01). Ультразвуковой девулканизатор непрерывного действия / М. М. Николюкин, А. С. Клинков, М. В. Соколов, П. С. Беляев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ТГТУ» ; № 2011154732/05 ; заявл. 30.12.2011 ; опубл. 10.08.2013. Бюл. № 22.
4. Применение интегральных критериев качества при переработке полимерных материалов валково-шнековым методом / А. С. Клинков, М. В. Соколов, Д. Л. Полушкин, И. В. Шашков, П. С. Беляев, Д. В. Туляков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 4. – С. 870 – 881.

Application of Ultrasound in Extrusion of Long Profile Rubber Billets with Specified Quality Parameters

M. V. Sokolov^{1✉}, P. S. Belyaev², D. V. Tulyakov³, K. V. Bryankin⁴

Departments: “Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering” (1), msok68@mail.ru; “Materials and Technology” (2), “Chemistry and Chemical Technology” (4), TSTU, Tambov, Russia; Tambov Business College (3), Tambov, Russia

Keywords: long profile billets; quality indicators of profile products; rubber products; ultrasonic waveguide; extrusion forming head.

Abstract: In order to improve and predict quality indexes of long profile rubber billets, experimental studies have been carried out to estimate the efficiency of ultrasonic influence using waveguide installed perpendicularly (radially) to the flow of extruded rubber mixture at the output of material cylinder before forming head, which also contributes to the development of new methods of polymer processing in the process of recycling polymeric materials, including crumb rubber.

References

1. Basov N.I., Lyubartovich S.A., Lyubartovich V.A. *Vibroformovaniye polimerov* [Vibroforming of polymers], Leningrad: Khimiya, 1979, 160 p. (In Russ.)

2. Sokolov M.V., Klinkov A.S., Belyayev P.S., Skuratov V.K., Odnol'ko V.G. *Metodologiya rascheta oborudovaniya dlya proizvodstva dlinnomernykh rezinotekhnicheskikh zagotovok zadannogo kachestva* [Methodology for calculating equipment for the production of long rubber blanks of a given quality], Moscow: Mashinostroyeniye, 2009, 352 p. (In Russ.)

3. Nikolyukin M.M., Klinkov A.S., Sokolov M.V., Belyayev P.S. *Ul'trazvukovoy devulkanizator nepreryvnogo deystviya* [Continuous ultrasonic devulcanizer], Russian Federation, 2013, Pat. 2489455 (In Russ.)

4. Klinkov A.S., Sokolov M.V., Polushkin D.L., Shashkov I.V., Belyayev P.S., Tulyakov D.V. [Application of integral quality criteria in processing of polymeric materials by the roller-screw method], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2008, vol. 14, no. 4, pp. 870-881. (In Russ., abstract in Eng.)

Anwendung von Ultraschall bei der Extrusion von langdimensionalen Gummiprofilwerkstücken mit festgelegten Qualitätsparametern

Zusammenfassung: Zur Verbesserung und Vorhersage der Qualität von langdimensionalen Profilgummi-Werkstücken sind experimentelle Untersuchungen durchgeführt, um die Wirksamkeit der Ultraschallwirkung mit einem Wellenleiter zu bewerten, der senkrecht (radial) zum Strang der extrudierten Gummimischung am Ausgang des Materialzylinders vor dem Formkopf montiert ist, was auch zur Entwicklung neuer Verfahren im Prozess der Wiederverwertung von Polymermaterialien, einschließlich Gummikrümel, beiträgt.

Application des ultrasons dans l'extrusion de pièces en caoutchouc de profil long avec des indicateurs de qualité prédéfinis

Résumé: Afin d'améliorer et de prédire les indicateurs de qualité des ébauches en caoutchouc à profil long, sont réalisées des études expérimentales sur l'évaluation de l'efficacité de l'application de l'effet ultrasonore au moyen d'un guide d'ondes monté perpendiculairement (radialement) au flux du mélange de caoutchouc extrudé à la sortie du cylindre de matériau devant la tête de dans le processus technologique de recyclage des matériaux polymères, y compris les miettes de caoutchouc.

Авторы: *Соколов Михаил Владимирович* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; *Беляев Павел Серафимович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Материалы и технология», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия; *Туляков Денис Валерьевич* – преподаватель ТОГАПОУ «Тамбовский бизнес-колледж», Тамбов, Россия; *Брянкин Константин Вячеславович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Химия и химические технологии», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОМЕМБРАННОЙ ОЧИСТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ ОТ КАТИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

Г. М. Княсова¹, В. А. Ломакина², О. А. Абоносимов^{2✉},
Ю. Т. Селиванов², Н. В. Шель³, К. В. Брянкин³

*Кафедра «Транспорт и технологии» (1), ЧВПОУ «Западно-Казахстанский
инновационно-технологический университет», Уральск, Республика Казахстан;
кафедры: «Механика и инженерная графика» (2), mig@tstu.ru;
«Химия и химические технологии» (3), ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: кинетические характеристики; мембрана; технологические растворы; электромембранный аппарат.

Аннотация: Исследовано влияние трансмембранных параметров электро-мембранного процесса разделения на основные кинетические характеристики мембран МГА-95П, ОПМ-К и ОПМН-К при очистке технологических вод металлообрабатывающего производства. Дан анализ влияния трансмембранных параметров на кинетические зависимости коэффициента равновесного распределения и коэффициента электродиффузионной проницаемости мембран ацетатцеллюлозного и полиамидного видов. Получены аппроксимационные выражения для расчета коэффициента равновесного распределения и коэффициента электродиффузионной проницаемости в зависимости от физико-химической основы материала полупроницаемой мембраны, величины плотности тока, концентрации и температуры технологического раствора.

Введение

Проблема загрязнения водных объектов технологическими растворами металлообрабатывающих производств, содержащих ионы тяжелых металлов, вызывает необходимость поиска новых и более эффективных методов очистки от них сточных вод, например, сосредоточенных выпусков и рассредоточенного стока [1 – 4].

Одним из наиболее эффективных методов очистки является электромембранное разделение, при котором загрязненные стоки проходят под давлением и воздействием электрического поля через полупроницаемые мембраны. При этом получают концентрат (ретентат) и фильтрат (пермеат), используемый в замкнутом водообороте.

Для разработки схемы очистки необходимы экспериментальные данные по процессу массопереноса через мембрану. Для расчета массопереноса через мембрану необходимо получить экспериментальные данные по коэффициентам равновесного распределения и электросорбционной способности мембран, электродиффузионной проницаемости мембран.

Литературные данные по результатам исследований ведущих специалистов в области процесса массопереноса через мембрану подтверждают, что электросорбционная емкость мембран и электродиффузионная проницаемость значи-

тельно влияет на процесс электромембранного разделения. Перенос растворенного вещества через мембрану за счет электродиффузии сопоставим по величине с переносом за счет конвективного потока растворителя через мембрану [5, 6]. Электродиффузия происходит при наличии электрического поля, когда заряженные частицы в растворе подвергаются электрическим силам и мигрируют в направлении поля. В мембране это может привести к неравномерному распределению концентрации вещества, в результате изменится электрическая проницаемость мембраны и степень селективности. Конвективный перенос происходит в результате движения раствора через мембрану под действием внешних сил, а диффузный перенос происходит в результате движения молекул вещества из-за разности их концентраций в разных точках системы. Изучение всех этих составляющих переноса важно для более полного понимания процессов массопереноса через мембраны и для разработки новых материалов с высокой эффективностью и селективностью в различных приложениях, таких как фильтрация воды, очистка газов и других жидкостей, а также в процессах различных видов сепарации и катализа [6].

Цель работы – исследование кинетических коэффициентов электромембранного метода в процессе очистки технологических вод от катионов тяжелых металлов.

Результаты экспериментальных исследований

Для исследования электросорбционной емкости мембран применяли лабораторную установку, схема которой представлена на рис. 1.

Для поддержания необходимого градиента электрического потенциала (плотности тока) использовался источник постоянного электрического тока, что позволяло поддерживать постоянное значение плотности тока на мембране в течение всего опыта. Исследуемый раствор оставляли на 11 – 13 часов, чтобы установить диффузионное равновесие, то есть после определенного времени происходит равновесие между концентрацией исследуемого вещества на разных сторонах мембраны.

Коэффициент равновесного распределения k_p определяется по следующему выражению [7, 8]:

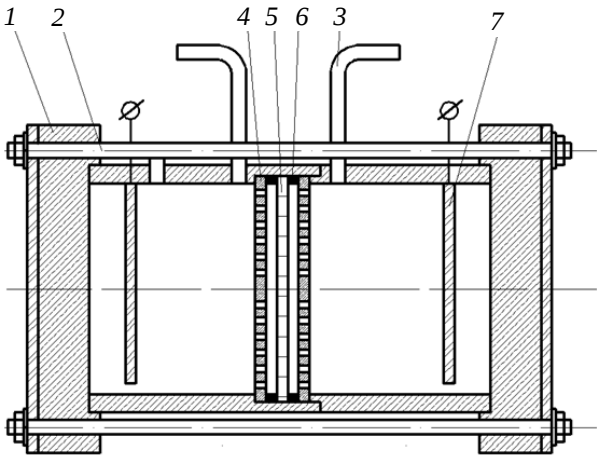


Рис. 1. Лабораторная установка для исследования электросорбционной емкости:

- 1 – корпус; 2 – шпильки; 3 – трубки контроля уровня раствора в камерах;
4 – перфорированные пластины; 5 – мембрана; 6 – прокладки уплотнения; 7 – электроды

$$k_p = \frac{C_M}{C_{исх}}, \quad (1)$$

где C_M , $C_{исх}$ – концентрации растворенного вещества в полупроницаемой мембране и исследуемом растворе соответственно, кг/м³,

На рисунке 2 приведена схема лабораторной установки, применяемая для исследования электродиффузионной проницаемости мембран.

Мембраны помещались в ячейку для измерения коэффициента электродиффузионной проницаемости и в камеры заливали раствор известной концентрации, который должен проходить через мембрану. Электроды, подключенные к постоянному электрическому току, создавали движущую силу, которая приводила к прохождению растворов через мембраны. Образующиеся различия концентраций измерялись для определения коэффициента электродиффузионной проницаемости мембраны.

Коэффициент электродиффузионной проницаемости $P_{эд}$ рассчитывали по следующей формуле [9]

$$P_{эд} = \frac{M}{F_M \tau i}, \quad (2)$$

где M – масса проницаемого вещества, кг; F_M – рабочая площадь мембраны, м²; τ – время экспериментальных исследований, с; i – плотность тока, А/м².

При проведении экспериментальных исследований кинетических характеристик процесса электромембранной очистки использовались отечественные ацетатцеллюлозная мембрана МГА-95П и полиамидные ОПМ-К, ОПМН-К, промышлен-

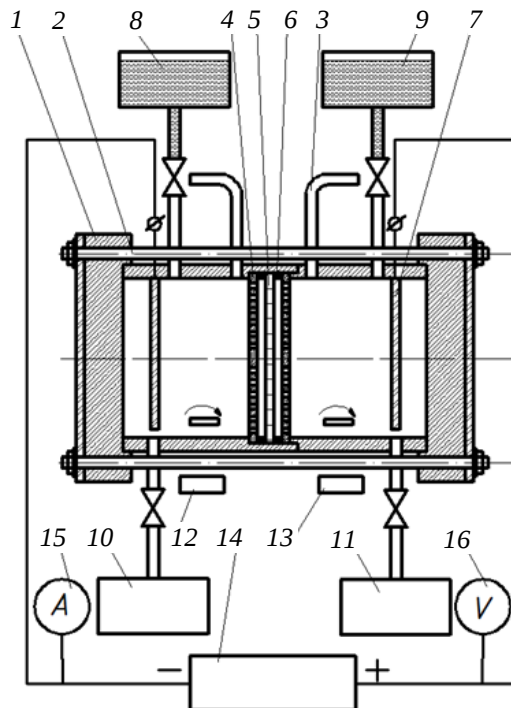


Рис. 2. Схема электродиффузионной установки:

1 – корпус; 2 – шпильки; 3 – капилляры; 4 – перфорированные пластины; 5 – мембрана; 6 – прокладки; 7 – электроды; 8 – 11 – емкости раствора; 12, 13 – магнитные мешалки; 14 – источник постоянного тока; 15 – амперметр; 16 – вольтметр

Таблица 1

Основные характеристики модельных растворов

Катионы металлов	ПДК, кг/м ³	Концентрация, кг/м ³	Температура, °С
Fe ²⁺	0,10	0,5...2,2	5...20
Ni ²⁺	0,02	0,3...2,0	

ленно выпускаемые ЗАО НТЦ «Владипор» (г. Владимир). При выборе мембран учитывалось наиболее оптимальное соотношение удельной производительности и задерживающей способности, обеспечивающей требования к качеству пермеата. В качестве объектов для проведения экспериментальных исследований использованы модельные растворы, имитирующие технологические растворы АО «Тамбовмаш», основные характеристики которых приведены в табл. 1.

Коэффициент равновесного распределения находится в определенной зависимости от материала мембран, природы растворенных веществ и их концентрации в исходном растворе, плотности тока [6, 10]. Полученные данные в ходе экспериментальных исследований по влиянию концентрации исходного раствора и плотности тока на величину коэффициента равновесного распределения водных растворов железа и никеля представлены на рис. 3. Графики зависимостей свидетельствуют о том, что с ростом концентрации исходного раствора, уменьшается сорбционная способность полимерных мембран. Это объясняется заполнением пор сорбированными веществами, что приводит к снижению их сечения, через которое проходит вода. С уменьшением сечения молекулы, наиболее приспособленные к сорбированию, подвергаются заполнению наиболее узких пор, что приводит к полной блокировке этих пор и ограничению доступности воды. Этот аспект играет важную роль в объяснении отдельных кинетических характеристик массопереноса для мембранных разделительных процессов.

Температура заметно влияет на процесс сорбции веществ из раствора. В литературе [9, 11, 12] отмечено, что температура может как способствовать, так и препятствовать сорбции. В данном случае, наблюдалось снижение сорбционной способности полимерных мембран при увеличении температуры раствора. Это связано с тем, что при повышении температуры растворимость вещества в растворе увеличивается. В соответствии с данными из [12], атомы, образующие поверхность адсорбента, взаимодействуют как с молекулами растворенных веществ, так и с молекулами растворителя во время сорбции из растворов. При этом экспериментально установлено, что вещества с более высокой растворимостью в воде адсорбируются менее интенсивно [11, 12]. Ожидается, что эффекты взаимодействия проявятся в различных физико-химических свойствах мембран, например, в их пористости, зарядах на поверхности (например, ацетатцеллюлозные мембраны имеют отрицательный заряд, в то время как полиамидные мембраны – положительный) и т.д. [13].

Данный эффект можно объяснить различием физико-химических свойств мембран, их пористости и зарядовых характеристик поверхностей, что было замечено в ранее проведенных исследованиях [13].

Для расчета равновесных коэффициентов распределения использовано аппроксимационное уравнение вида [14]

$$k_p = bC^{n-1}\left(\frac{T_0}{T}\right)^m, \tag{3}$$

где C – концентрация раствора, кг/м³; T_0 , T – реперная (293 К) и рабочая температуры соответственно; b , n , m – экспериментальные коэффициенты.

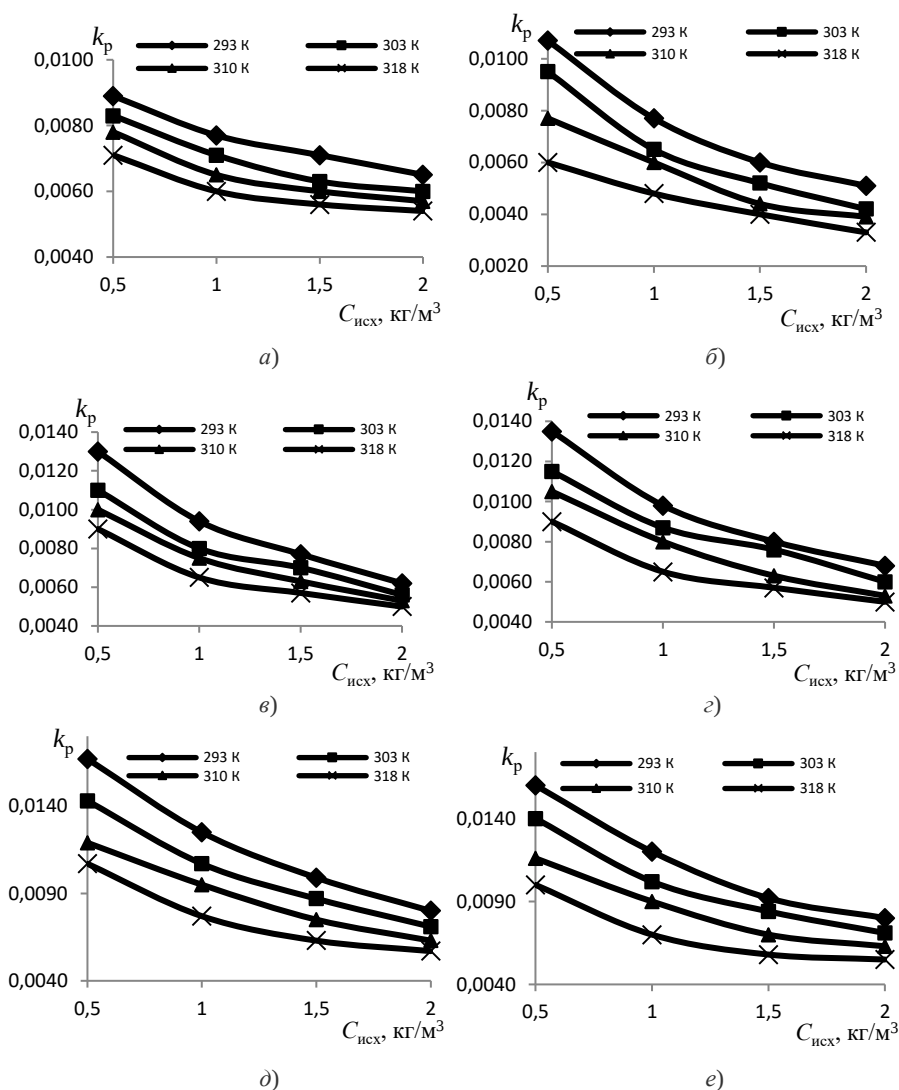


Рис. 3. Зависимости коэффициента равновесного распределения мембран МГА-95П (а, б), ОПМ-К (в, г), ОПМН-К (д, е) при $i=5,2 \text{ A/m}^2$ для раствора: а, в, д – никеля; б, г, е – железа

Значения эмпирических коэффициентов для выражения (3) приведены в табл. 2. Расхождение экспериментальных и рассчитанных по формуле (3) значений не превышает 15 %, что является достаточным для инженерных расчетов.

На рисунках 4 представлены результаты экспериментальных исследований коэффициента электродиффузионной проницаемости для всех исследуемых растворов и мембран. При рассмотрении зависимости изменения коэффициентов электродиффузионной проницаемости от концентрации исследуемых веществ можно отметить их уменьшение с увеличением концентрации растворенных веществ, которое характерно для всех исследуемых веществ и типов мембран. Объяснением такой реакции коэффициента электродиффузионной проницаемости на увеличение концентрации растворенных веществ является утверждение о том, что при сорбции растворенных веществ в мембране происходит уменьшение

Таблица 2

Значения эмпирических коэффициентов для выражения (3)

Раствор	Мембрана	b	m	n
Ni^{2+}	МГА-95П	0,0198	0,445	1,32
	ОПМ-К	0,0187	0,455	3,24
	ОПМН-К	0,0253	0,444	4,32
Fe^{2+}	МГА-95П	0,0215	0,492	2,51
	ОПМ-К	0,0118	0,772	2,31
	ОПМН-К	0,0377	0,468	4,02

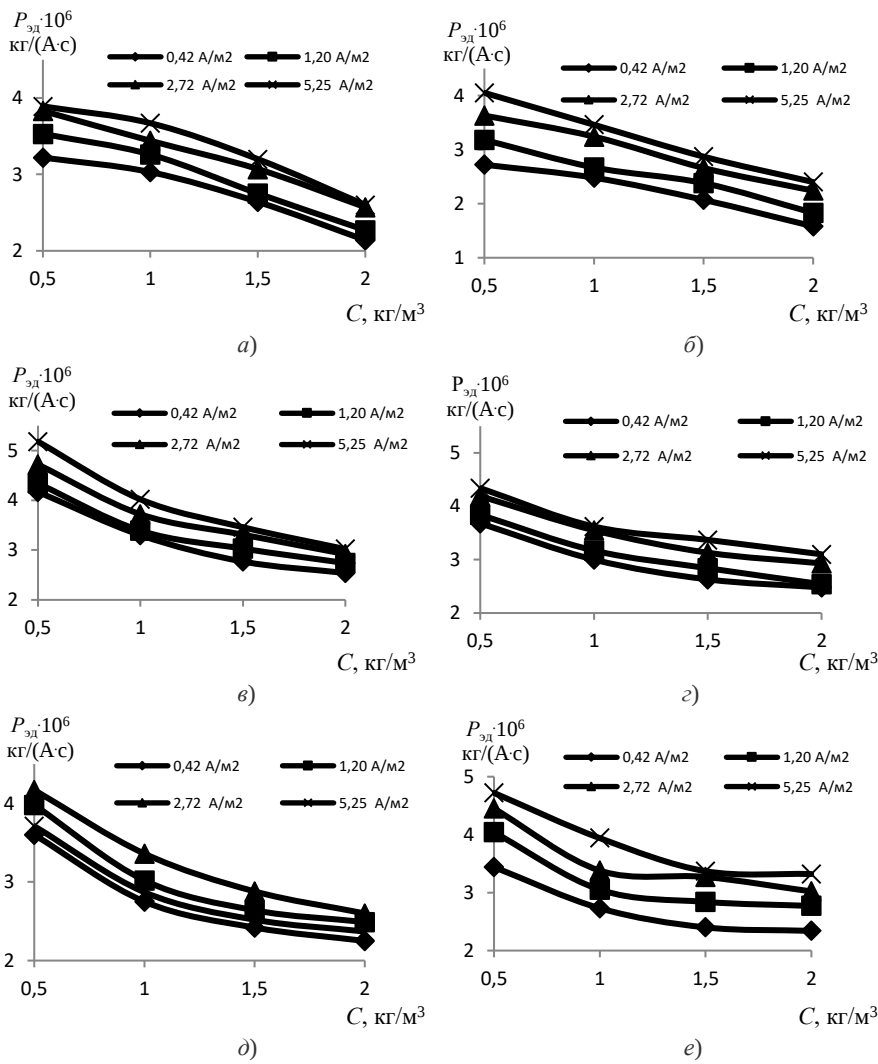


Рис. 4. Зависимости коэффициента электродиффузионной проницаемости мембран МГА-95П (а, б), ОПМ-К (в, г), ОПМН-К (д, е) при $T = 293 \text{ К}$ для раствора: а, в, д – никеля; б, г, е – железа

Таблица 3

Значения эмпирических коэффициентов для выражения (4)

Раствор	Мембрана	$k \cdot 10^6$	n	m	g	A
Ni^{2+}	МГА-95П	14,622	-0,454	0,0532	0,0056	-162,1
	ОПМ-К	15,876	-0,422	0,0757	0,0042	-163,2
	ОПМН-К	7,326	0,123	0,0812	-0,0356	-161,6
Fe^{2+}	МГА-95П	20,624	-0,642	0,1425	0,0348	-172,4
	ОПМ-К	14,234	-0,373	0,0764	0,0042	-183,2
	ОПМН-К	5,642	0,131	0,1694	-0,0456	-47,2

свободного сечения пор и, как результат, уменьшение транспорта ионов через поровое пространство [15, 16].

Следует также отметить, что нарастание плотности тока способствует увеличению коэффициента электродиффузионной проницаемости, так как электрическое поле играет роль движущей силы, которая способствует переносу ионов через мембрану. Электродиффузионный массоперенос линейно зависит от напряжения, при условии сохранения структурных свойств мембран и свойств растворов. Поэтому, при росте плотности тока, увеличивается сила, действующая на ионы, и ускоряется процесс переноса через мембраны. Эти результаты могут быть полезны для оптимизации работы электромембранных устройств и повышения эффективности процессов разделения и очистки растворов [14 – 18].

Сравним величины коэффициентов электродиффузионной проницаемости, полученные для всех исследуемых мембран и растворенных веществ (см. рис. 4). Мембрана ОПМН-К имеет наибольшие величины коэффициента электродиффузионной проницаемости, тогда как минимальные значения наблюдаются в случае использования мембраны МГА-95П. Причинами являются различия в материалах, из которых изготовлены активные слои мембран, а также различные пористости и поверхностные потенциалы мембран.

Проведенный анализ зависимостей изменения коэффициента электродиффузионной проницаемости и литературных данных других авторов исследований позволил предложить следующее выражение для математического описания [15]:

$$P_{\text{эд}} = k(C^n)(i^m) \exp(Cg) \exp\left(\frac{A}{T}\right), \quad (4)$$

где C – концентрация растворенных веществ, кг/м³; a, m, n, k, g – эмпирические коэффициенты.

Расхождения экспериментальных и расчетных значений коэффициента электродиффузионной проницаемости мембран совпадают достаточно хорошо и не превышают 15 %.

Заключение

Для очистки технологических растворов от ионов тяжелых металлов выбран метод электромембранного разделения, как наиболее экономически и экологически эффективный. Результатом проведенных экспериментальных исследований является получение оригинальных данных по коэффициентам равновесного распределения и коэффициентам электродиффузионной проницаемости мембран МГА-95П, ОПМ-К, ОПМН-К по растворам никеля и железа в зависимости от изменения основных параметров проведения процесса разделения. Проанализиро-

ваны зависимости коэффициента равновесного распределения и коэффициента электродиффузионной проницаемости от концентрации растворенных веществ для всех исследуемых мембран, и выявлены факторы влияния. Объяснено влияние температуры раствора на изменение коэффициента равновесного распределения и плотности тока на изменение коэффициента электродиффузионной проницаемости мембран.

В результате анализа полученных зависимостей и литературных данных других исследователей предложены выражения для математического описания коэффициента равновесного распределения и коэффициента электродиффузионной проницаемости мембран со значениями эмпирических коэффициентов для исследуемых растворов и мембран. Предложено использовать полученные результаты исследований в проектировании лабораторных, пилотных и промышленных установок, используемых в производственных процессах разделения, очистки и концентрирования технологических и сточных вод.

Работа выполнена в рамках проведения исследования по государственному заданию, проект № FEMU-2024-0011.

Список литературы

1. Проблемы экологии и рационального природопользования в контексте экономического развития России / В. Б. Сажин, А. Б. Полковников, И. Селдинас [и др.] // Успехи в химии и химической технологии. – 2009. – Т. 23, № 12(105). – С. 94 – 108.
2. Колесников, В. А. Очистка сточных вод на металлургических предприятиях / В. А. Колесников, В. И. Ильин, А. А. Кучеров // Экология производства. – 2010. – № 3. – С. 31 – 36.
3. Павлов, Д. В. Очистка сточных вод различных производств с применением наилучших доступных технологий / Д. В. Павлов, С. О. Вараксин, В. А. Колесников // Чистая вода: проблемы и решения. – 2010. – № 2–3. – С. 50 – 59.
4. Пути решения проблемы очистки сточных вод от тяжелых и радиоактивных металлов / Е. А. Комягин, В. Н. Мынин, И. Ф. Ляпин [и др.] // Экология и промышленность России. – 2008. – № 11. – С. 21 – 23.
5. Paidar, M. Membrane electrolysis – History, current status and perspective / M. Paidar, V. Fateev, K. Bouzek // Electrochimica Acta. – 2016. – Vol. 209. – P. 737 – 756. doi: 10.1016/j.electacta.2016.05.209
6. Свитцов, А. А. Введение в мембранные технологии. – М. : ДеЛи принт, 2007. – 170 с.
7. Toth, J. Adsorption: Theory, Modeling, and Analysis (Surfactant Science Series, Vol. 107). – Marcel Dekker, 2006. – 878 p.
8. Rouquerol, F. Adsorption by Powders and Porous Solids: Principles, Methodology and Applications / F. Rouquerol, J. Rouquerol, K. Sing. – San Diego, Calif.: Academic Press, 2005. – 467 p.
9. Some Kinetic Dependence of Electrohyperfiltration Method of Purification of Wastewater from Iron Ions / A. A. Levin, O. A. Abonosimov, S. I. Lazarev, O. A. Kovaleva // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2018. – Т. 24, № 2. – С. 295 – 306. doi: 10.17277/vestnik.2018.02.pp.295-306
10. Мембраны и мембранные технологии : монография / А. Б. Ярославцев [и др.] ; отв. ред. А. Б. Ярославцев. – М. : Научный мир, 2013. – 616 с.
11. Karge H. G., Weitkamp J. Adsorption and Diffusion (Molecular Sieves). – 2008. – 467 p. doi: 10.1007/978-3-540-73966-1
12. Ягодовский, В. Д. Адсорбция [Электронный ресурс] / В. Д. Ягодовский. – Эл. изд. – Электрон. текстовые дан. (1 файл pdf : 219 с.). М. : БИНОМ ; Лаборатория знаний, 2015. – 219 с. (Учебник для высшей школы). – Систем. требования: Adobe Reader XI ; экран 10

13. Ямпольский, Ю. П. Методы изучения свободного объема в полимерах / Ю. П. Ямпольский // Успехи химии. – 2007. – Т. 76, № 1. – С. 66 – 87.
14. Кинетические зависимости и технологическая эффективность электрохимического мембранного разделения сточных вод на очистных предприятиях / О. А. Абоносимов, М. А. Кузнецова, О. А. Ковалева, В. М. Поликарпов, В. М. Дмитриев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 4. – С. 641 – 655. doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.641-655
15. Чепеняк, П. А. Электродиффузионная проницаемость ультрафильтрационных мембран в водных фосфатсодержащих растворах / П. А. Чепеняк, В. Л. Головашин, С. И. Лазарев // Известия высших учебных заведений. Серия Химия и химическая технология. – 2012. – Т. 55, № 8. – С. 52 – 56.
16. Филиппов, А. Н. Ячеечная модель ионообменной мембраны. Электродиффузионный коэффициент и диффузионная проницаемость / А. Н. Филиппов // Коллоидный журнал. – 2021. – Т. 83, № 3. – С. 360 – 372. doi: 10.31857/S002329122103006X
17. Акулиничев, А. М. Исследование электробаромембранного разделения промышленных технологических растворов, содержащих ионы тяжелых металлов / А. М. Акулиничев, О. А. Абоносимов, С. И. Лазарев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 1. – С. 120 – 128. doi: 10.17277/vestnik.2017.01.pp.120-128
18. Мембранная очистка технологических растворов от ионов железа и марганца / А. А. Левин [и др.] // Вестник технологического университета. – 2019. – Т. 22, № 11. – С. 70 – 73.

Efficiency of Electromembrane Purification of Process Solutions from Heavy Metal Cations

G. M. Kiyasova¹, V. A. Lomakina², O. A. Abonosimov^{2✉},
Yu. T. Selivanov², N. V. Shel³, K. V. Bryankin³

Department of Transport and Technology (1), West Kazakhstan Innovation and Technology University, Uralsk, Republic of Kazakhstan;

Department of Mechanics and Engineering Graphics (2), mig@tstu.ru;

Department of Chemistry and Chemical Technology (3), TSTU, Tambov, Russia

Keywords: kinetic characteristics; membrane; technological solutions; electric membrane apparatus.

Abstract: In this paper, the kinetic coefficients of the electromembrane method were studied in the process of purifying process waters from heavy metal cations. The objects of research are technological solutions containing iron and nickel cations and semi-permeable cellulose and polymer acetate membranes with various selectively permeable characteristics. The influence of transmembrane parameters of the electromembrane separation process on the main kinetic characteristics of MGA-95P, OPM-K and OPMN-K membranes during the purification of process waters in metalworking production was studied. An analysis of the influence of transmembrane parameters on the kinetic dependences of the equilibrium distribution coefficient and the coefficient of electrodiffusion permeability of cellulose acetate and polyamide membranes is given. Approximation expressions are obtained for the theoretical calculation of the equilibrium distribution coefficient and the electrodiffusion permeability coefficient depending on the physicochemical basis of the semipermeable membrane material, the current density, the concentration and temperature of the process solution. Numerical values of empirical coefficients have been determined that

make it possible to calculate and predict the values of the equilibrium distribution coefficient and the electrodiffusion permeability coefficient, which can be used in the design of laboratory, pilot and industrial installations used in production processes for the separation, purification and concentration of technological and waste waters.

References

1. Sazhin V.B., Polkovnikov A.B., Seldinas I. [et al.], [Problems of ecology and rational use of natural resources in the context of economic development of Russia], *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Advances in chemistry and chemical technology], 2009, vol. 23, no. 12(105), pp. 94-108 (In Russ., abstract in Eng.)
2. Kolesnikov V.A., Il'in V.I., Kucherov A.A. [Wastewater treatment at metallurgical enterprises], *Ekologiya proizvodstva* [Ecology of production], 2010, no. 3, pp. 31-36 (In Russ., abstract in Eng.)
3. Pavlov D.V., Varaksin S.O., Kolesnikov V.A. [Wastewater treatment of various industries using the best available technologies], *Chistaya voda: problemy i resheniya* [Clean water: problems and solutions], 2010, no. 2-3, pp. 50-59. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Komyagin Ye.A., Mynin V.N., Lyapin I.F. [et al.], [Solutions to the Problem of Wastewater Purification from Heavy and Radioactive Metals], *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2008, no. 11, pp. 21-23 (In Russ., abstract in Eng.)
5. Paidar M., Fateev V., Bouzek K. Membrane electrolysis – History, current status and perspective, *Electrochimica Acta*, 2016, vol. 209, pp. 737-756. doi: 10.1016/j.electacta.2016.05.209
6. Svittsov A.A. *Vvedeniye v membrannyye tekhnologii* [Introduction to Membrane Technologies], Moscow: DeLi print, 2007, 170 p. (In Russ.)
7. Toth J. *Adsorption: Theory, Modeling, and Analysis* (Surfactant Science Series, vol. 107), Marcel Dekker, 2006, 878 p.
8. Rouquerol F., Rouquerol J., Sing K. *Adsorption by Powders and Porous Solids: Principles, Methodology and Applications*, San Diego, Calif.: Academic Press, 2005, 467 p.
9. Levin A.A., Abonosimov O.A., Lazarev S.I., Kovaleva O.A. Some Kinetic Dependence of Electrohyperfiltration Method of Purification of Wastewater from Iron Ions, *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2018, vol. 24, no. 2, pp. 295-306. doi: 10.17277/vestnik.2018.02.pp.295-306
10. Yaroslavtsev A.B. [et al.] *Membrany i membrannyye tekhnologii: monografiya* [Membranes and membrane technologies: monograph], Moscow: Nauchnyy mir, 2013, 616 p. (In Russ.)
11. Karge H.G., Weitkamp J. *Adsorption and Diffusion* (Molecular Sieves), 2008, 467 p. doi: 10.1007/978-3-540-73966-1
12. Yagodovskiy V.D. *Adsorbtsiya* [Adsorption], Moscow: BINOM; Laboratoriya znaniy, 2015, 219 p. (In Russ.)
13. Yampol'skiy Yu.P. [Methods for studying free volume in polymers], *Uspekhi khimii* [Advances in Chemistry], 2007, vol. 76, no. 1, pp. 66-87. (In Russ., abstract in Eng.)
14. Abonosimov O.A., Kuznetsova M.A., Kovaleva O.A., Polikarpov V.M., Dmitriyev V.M. [Kinetic dependencies and technological efficiency of electrochemical membrane separation of wastewater at treatment plants], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 4, pp. 641-655. doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.641-655 (In Russ., abstract in Eng.)
15. Chepenyak P.A., Golovashin V.L., Lazarev S.I. [Electrodiffusion permeability of ultrafiltration membranes in aqueous phosphate-containing solutions], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [News of higher educational institutions. Series Chemistry and chemical technology], 2012, vol. 55, no. 8, pp. 52-56. (In Russ., abstract in Eng.)
16. Filippov A.N. [Cell model of ion-exchange membrane. Electrodiffusion coefficient and diffusion permeability], *Kolloidnyy zhurnal* [Colloid journal], 2021, vol. 83, no. 3, pp. 360-372. doi: 10.31857/S002329122103006X (In Russ., abstract in Eng.)

17. Akulinichev A.M., Abonosimov O.A., Lazarev S.I. [Study of electrobaromembrane separation of industrial process solutions containing heavy metal ions], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 1, pp. 120-128. doi: 10.17277/vestnik.2017.01.pp.120-128 (In Russ., abstract in Eng.)

18. Levin A.A. [et al.], [Membrane purification of process solutions from iron and manganese ions], *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2019, vol. 22, no. 11, pp. 70-73 (In Russ., abstract in Eng.)

Untersuchung der kinetischen Koeffizienten des Prozesses der Elektromembranreinigung von technologischen Lösungen aus Schwermetall-Kationen

Zusammenfassung: Es ist der Einfluss von Transmembranparametern des Elektromembran-Trennprozesses auf die wichtigsten kinetischen Eigenschaften von MGA-95P-, OPM-K- und OPMN-K-Membranen während der Reinigung von Prozesswässern in der metallverarbeitenden Produktion untersucht. Es ist die Analyse des Einflusses von Transmembranparametern auf die kinetischen Abhängigkeiten des Gleichgewichtsverteilungskoeffizienten und des Elektrodifusionspermeabilitätskoeffizienten von Acetat-Cellulose- und Polyamid-Membranen vorgestellt. Es sind Näherungsausdrücke zur Berechnung des Gleichgewichtsverteilungskoeffizienten und des Elektrodifusionspermeabilitätskoeffizienten in Abhängigkeit von der physikalisch-chemischen Basis des semipermeablen Membranmaterials, der Stromdichte, der Konzentration und der Temperatur der Prozesslösung erhalten.

Étude des coefficients cinétiques du procédé de nettoyage électromembranaire des solutions de cations de métaux lourds

Résumé: Est étudiée l'influence des paramètres transmembranaires du processus de la séparation électromembranaire sur les principales caractéristiques cinétiques des membranes MGA-95P, OPM-K et OPMN-K dans le nettoyage des eaux de traitement de la production de métaux. Est analysée l'influence des paramètres transmembranaires sur les dépendances cinétiques du coefficient de répartition à l'équilibre et du coefficient de perméabilité à l'électrodifusion des membranes des espèces d'acétat-cellulose et de polyamide. Sont obtenues des expressions d'approximation pour calculer le coefficient de la distribution d'équilibre et le coefficient de perméabilité à l'électrodifusion en fonction de la base physico-chimique du matériau de la membrane semi-perméable, de la densité de courant, de la concentration et de la température de la solution.

Авторы: *Киясова Гульзада Мадиевна* – старший преподаватель кафедры «Транспорт и технологии», ЧВПОУ «Западно-Казахстанский инновационно-технологический университет», Уральск, Республика Казахстан; *Ломакина Виктория Александровна* – аспирант кафедры «Механика и инженерная графика»; *Абоносимов Олег Аркадьевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Механика и инженерная графика»; *Селиванов Юрий Тимофеевич* – доктор технических наук, доцент кафедры «Механика и инженерная графика»; *Шель Наталья Владимировна* – доктор химических наук, профессор кафедры «Химия и химические технологии»; *Брянкин Константин Вячеславович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Химия и химические технологии», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

РАСЧЕТ МИНИМАЛЬНОГО РАЗМЕРА ЧАСТИЦ, УЛАВЛИВАЕМЫХ В ПЕРВОЙ СТУПЕНИ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЯ-КЛАССИФИКАТОРА

М. А. Юровская^{1✉}, В. К. Леонтьев¹, А. Е. Лебедев²

*Кафедры: «Химическая технология органических веществ» (1),
barashevama@ystu.ru; «Технологические машины и оборудование» (2),
ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет»,
Ярославль, Россия*

Ключевые слова: время осаждения; минимальный размер улавливаемых частиц; пылеуловитель-классификатор; скорость осаждения; центробежная сепарация.

Аннотация: Представлено описание принципа работы нового высокоэффективного пылеуловителя-классификатора, включающего три ступени очистки пылегазового потока. Предложена методика расчета минимального размера частиц, улавливаемых на первой ступени данного аппарата, основанная на закономерностях осаждения частиц при ламинарном режиме. Выполнен расчет минимального размера улавливаемых частиц – отходов литейного производства. Получена зависимость минимального размера улавливаемых частиц от расхода газового потока, а также распределение минимального размера улавливаемых частиц по сечению первой ступени.

Введение

Во многих отраслях промышленности при проведении технологических операций происходит попадание мелкодисперсной пыли в отходящие газовые потоки. Остаточное количество этих частиц зачастую попадает в атмосферу и пагубно влияет на флору и фауну, а также необратимо воздействует на здоровье человека [1 – 3]. Поэтому внедрение новых и интенсификация существующих технологических процессов и аппаратов очистки промышленных выбросов является очень важной задачей. В настоящее время в качестве пылеулавливающего оборудования наиболее широкое применение находят аппараты инерционного типа. Они просты в эксплуатации и изготовлении, позволяют очищать пылегазовые потоки с большой начальной запыленностью и выделять пыль в сухом виде [1]. Кроме этого, в ряде отраслей промышленности необходимо не только выделить пыль из газового потока, но и классифицировать ее по фракциям, так как частицы определенного размера являются целевым продуктом. Задача классификации может быть решена как в отдельном аппарате – классификаторе, так и в аппаратах, совмещающих функции пылеуловителей и классификаторов [1, 4].

В Ярославском государственном техническом университете разработана одна из моделей такого пылеуловителя-классификатора.

Цель работы – рассчитать минимальный диаметр частиц, улавливаемых на первой ступени очистки пылеуловителя-классификатора. Установить зависимость минимального размера частиц от объемного расхода газовой фазы в аппарате.

Методика и результаты расчета минимального размера улавливаемых частиц

Разработанный пылеуловитель-классификатор позволяет осуществить высокоэффективную очистку пылегазового потока и одновременно классифицировать уловленную пыль по фракциям. Кроме этого, данная модель имеет ряд конструктивных и технологических преимуществ перед аналогичными конструкциями [5, 6].

Схема аппарата представлена на рис. 1. В корпусе аппарата 1 размещены три ступени выделения твердых частиц из газового потока. Газ, содержащий взвешенные частицы, через спиральный входной патрубок 2 поступает на *первую* ступень очистки I, где крупные частицы пыли за счет центробежной силы смещаются к периферии и по наклонному днищу 4 опускаются к патрубку 3, а затем удаляются из аппарата. Поток газа со средней и мелкой фракцией поступает на *вторую* ступень очистки II, расположенную в пространстве между приемным цилиндром 6 и экраном 7. На второй ступени очистки за счет изменения направления движения потока происходит отделение частиц средней фракции, которые выводятся через патрубок 5. Поток газа с мелкой фракцией огибает наружную поверхность приемного цилиндра 8 и поступает на *третью* ступень очистки III, на которой за счет неподвижных лопастей 9 происходит закрутка пылегазового потока, повышается действие центробежной силы, в результате чего мелкодисперсные частицы отделяются от газового потока через выходной патрубок 10, а мелкодисперсные частицы пыли по спиралеобразной траектории вдоль стенок приемного цилиндра 8 опускаются на наклонное днище 11 и выводятся из аппарата через патрубок 12.

Расчет минимального размера частиц, улавливаемых в первой ступени пылеуловителя-классификатора, проводился для частиц – отходов литейного производства с плотностью $\rho_{\text{ч}} = 3170 \text{ кг/м}^3$, которые равномерно распределены в воздушном потоке плотностью $\rho = 1,206 \text{ кг/м}^3$ и динамической вязкостью $\mu = 18 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$. Канал первой ступени пылеуловителя-классификатора имеет следующие размеры:

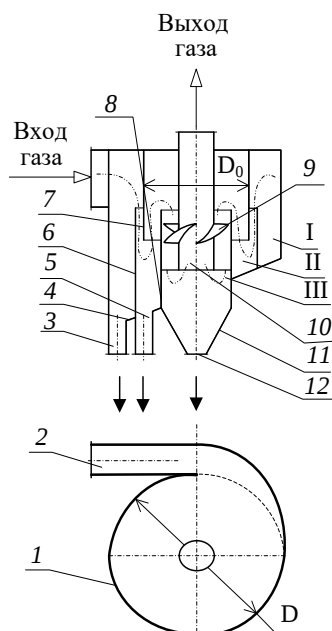


Рис. 1. Принципиальная схема пылеуловителя-классификатора

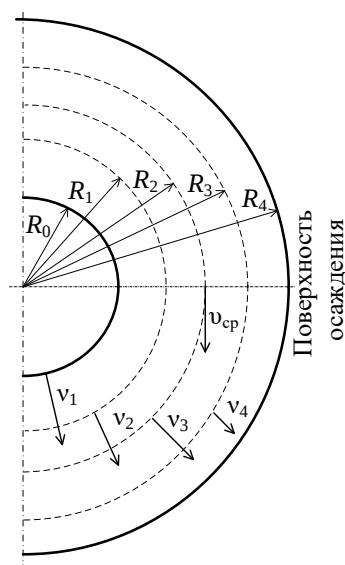


Рис. 2. К расчету скорости осаждения частиц для различных сечений

наружный диаметр канала $D = 0,35$ м; внутренний диаметр канала $D_0 = 0,21$ м; высота первой ступени пылеуловителя-классификатора $h_{ст} = 0,1155$ м.

В пылегазовом потоке выделим концентрические продольные сечения, находящиеся на расстоянии $R_0 = 0,1050$ м; $R_1 = 0,1225$ м; $R_2 = 0,1400$ м; $R_3 = 0,1575$ м; $R_4 = 0,1750$ м от центра вращения потока (рис. 2). Расчет проводим в следующей последовательности.

1. Задается расход пылегазового потока Q .

2. Определяется скорость прохождения расстояния от выбранного сечения до стенки осаждения v_i , то есть скорость, с которой частицы должны двигаться, находясь в данном сечении, чтобы достичь поверхности осаждения.

$$v_1 = \frac{R_4 - R_0}{\tau_{пр}}; \quad v_2 = \frac{R_4 - R_1}{\tau_{пр}}; \quad v_3 = \frac{R_4 - R_2}{\tau_{пр}}; \quad v_4 = \frac{R_4 - R_3}{\tau_{пр}}.$$

Время пребывания частиц в первой ступени $\tau_{пр}$, с, определяется как

$$\tau_{пр} = \frac{V_{ст}}{Q},$$

где $V_{ст}$ – объем первой ступени пылеуловителя-классификатора, м³, Q – объемный расход пылегазовой смеси, м³/с.

3. Определяется угловая скорость вращения потока в ступени.

Предположим, что режим движения потока турбулентный, поэтому считаем скорость движения во всех точках приблизительно одинаковой и равной средней скорости $v_{ср}$. Тогда угловая скорость вращения потока, с⁻¹,

$$\omega = \frac{v_{ср}}{R_{ср}} = \frac{Q}{S_{вх} R_{ср}}.$$

За средний радиус вращения $R_{ср}$ принимается радиус $R_2 = 0,1400$ м. Средняя скорость потока определяется через объемный расход Q и площадь входного патрубка $S_{вх} = 0,0085$ м².

4. Рассчитывается минимальный размер частиц, которые осядут на поверхности. Будем считать режим осаждения этих частиц ламинарным. Для ламинарного режима осаждения диаметр улавливаемых частиц определяется по формуле [7]

$$d_{ч} = \sqrt{\frac{18 \mu v_{ос}}{(\rho_{ч} - \rho) \omega^2 R}},$$

где R – радиус вращения, м.

Принимается, что скорость осаждения данных частиц $v_{ос}$ равна скорости прохождения расстояния от выбранного сечения до стенки осаждения, то есть $v_{ос1} = v_1$ (при $R = R_0$), $v_{ос2} = v_2$ (при $R = R_1$), $v_{ос3} = v_3$ (при $R = R_2$), $v_{ос4} = v_4$ (при $R = R_3$).

Результаты расчетов представлены в табл. 1. График зависимости минимального размера частиц, оседающих на поверхности в первой ступени пылеуловителя-классификатора, от объемного расхода пылегазовой смеси показан на рис. 3.

Анализ полученных результатов показал, что с увеличением объемного расхода пылегазовой смеси размер улавливаемых частиц уменьшается, что связано с увеличением центробежной силы потока и, как следствие, увеличением скорости осаждения частиц. При этом, чем меньше расстояние до поверхности осаждения, тем меньше размер улавливаемых частиц, что связано с увеличением центробежной силы от центра к периферии канала первой ступени пылеуловителя-классификатора.

Таблица 1

Результаты расчета минимального размера частиц, улавливаемых в первой ступени пылеуловителя-классификатора при различных расходах пылегазовой смеси

Рассчитываемые параметры	Расход пылегазовой смеси, м³/с				
	0,136	0,126	0,102	0,076	0,051
Время пребывания частиц в первой ступени пылеуловителя-классификатора, с	0,052	0,057	0,070	0,093	0,140
Скорость осаждения частиц в сечении, м/с					
R_0, v_1	1,34	1,24	1	0,75	0,5
R_1, v_2	1	0,93	0,75	0,56	0,38
R_2, v_3	0,67	0,62	0,5	0,38	0,25
R_3, v_4	0,33	0,31	0,25	0,19	0,13
Угловая скорость вращения потока, с ⁻¹	114,29	105,68	85,71	64,29	42,86
Минимальный размер улавливаемых частиц в сечении, мкм:					
$R_0, d_{ч1}^{min}$	10,00	10,40	11,50	13,30	16,30
$R_1, d_{ч2}^{min}$	8,00	8,30	9,20	10,70	13,10
$R_2, d_{ч3}^{min}$	6,10	6,40	7,10	8,20	10,00
$R_3, d_{ч4}^{min}$	4,10	4,20	4,70	5,40	6,70

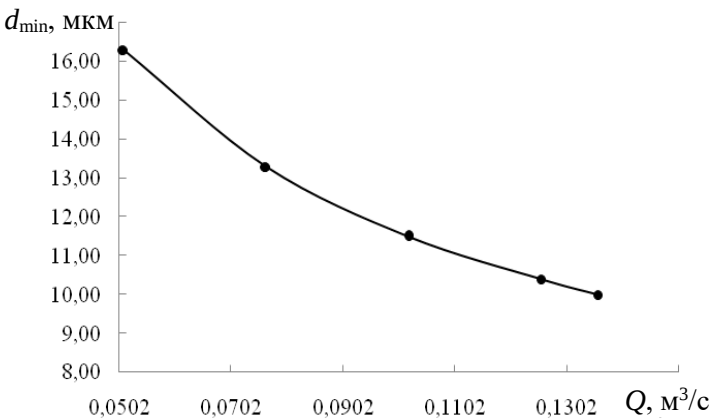


Рис. 3. График зависимости минимального размера улавливаемых частиц от объемного расхода пылегазовой смеси при $R = R_0$

Заключение

Предложена методика расчета минимального размера частиц, улавливаемых на первой ступени очистки нового пылеуловителя-классификатора. Получена зависимость $d_q^{min} = f(Q)$. Представленная методика может быть использована для предварительной оценки эффективности работы аппарата и фракционного состава дисперсной фазы, уловленной на первой ступени очистки пылеуловителя-классификатора.

Список литературы

1. Сугак, А. В. Центробежные пылеуловители и классификаторы. Моделирование, расчет, проектирование : монография / А. В. Сугак, Е. В. Сугак. – Германия : LAP Lamber Academic Publishing GmbH & Co, 2012. – 226 с.
2. Чекалов, Л. В. Экотехника. Защита атмосферного воздуха от выбросов пыли, аэрозолей и туманов / Л. В. Чекалов. – Ярославль : Русь, 2004. – 424 с.
3. Сугак, Е. В. Процессы очистки газов в турбулентных газодисперсных потоках. Моделирование и интенсификация : монография / Е. В. Сугак. – Германия : LAP Lamber Academic Publishing GmbH & Co, 2011. – 308 с.
4. Смирнов, Д. Е. Совершенствование процесса сепарации частиц в инерционно-центробежном пылеуловителе-классификаторе : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / Смирнов Дмитрий Евгеньевич. – Ярославль, 2011. – 127 с.
5. Юровская, М. А. Экспериментальные исследования пылеуловителя-классификатора / М. А. Юровская, Д. Е. Смирнов, А. В. Сугак, В. К. Леонтьев // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 2014. – Т. 57, № 10. – С. 84 – 86.
6. Yurovskaya, M. A. Improving the Operating Efficiency of a Dust Collector-Classified / M. A. Yurovskaya, A. E. Lebedev, V. K. Leont'ev // Chemical and Petroleum Engineering. – 2019. – Vol. 55, No. 3-4. – P. 324 – 328. doi: 10.1007/s10556-019-00622-9
7. Скобло, А. И. Процессы и аппараты нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности / А. И. Скобло, И. А. Трегубова, Ю. К. Молоканов. – М. : Химия, 1982. – 584 с.

Calculation of the Minimum Size of Particles Captured in the First Stage Dust Collector-Classified

M. A. Yurovskaya^{1✉}, V. K. Leontiev¹, A. E. Lebedev²

*Departments: Chemical Technology of Organic Substances (1), barashevama@ystu.ru;
Technological Machines and Equipment (2),
Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia*

Keywords: settling time; minimum size of trapped particles; dust collector-classified; settling rate; centrifugal separation.

Abstract: The paper describes the principle of operation of a new high-efficiency dust collector-classified including three stages of dust and gas flow purification. The method of calculation of the minimum size of particles captured at the first stage of this device, based on the laws of particle deposition in the laminar regime, is proposed. Calculation of the minimum size of captured particles – foundry wastes is carried out. The dependence of the minimum size of captured particles on the gas flow rate, as well as the distribution of the minimum size of captured particles along the cross-section of the first stage is obtained.

References

1. Sugak A. V., Sugak E. V. *Centrobezhnye pyleuloviteli i klassifikatory. Modelirovanie, raschet, proektirovanie: monografiya* [Centrifugal dust collectors and classifiers. Modeling, calculation, design: monograph], Germany: LAP Lamber Academic Publishing GmbH & Co, 2012, 226 p. (In Russ.).

2. Chekalov L.V. *Ekotekhnika. Zashchita atmosfernogo vozduha ot vybrosov pyli, aerozolej i tumanov* [Ecotechnika. Protection of atmospheric air from emissions of dust, aerosols and fogs], Yaroslavl: Rus, 2004, 424 p. (In Russ.).

3. Sugak E.V. *Processy ochistki gazov v turbulentnykh gazodispersnykh potokakh. Modelirovanie i intensifikaciya: monografiya* [Gas purification processes in turbulent gas-dispersed flows. Modeling and intensification: monograph], Germany: LAP Lamber Academic Publishing GmbH & Co, 2011, 308 p. (In Russ.).

4. Smirnov D.E. *PhD Dissertation (Engineering)*, Yaroslavl, 2011, 127 p. (In Russ.)

5. Yurovskaya M.A., Smirnov D.E., Sugak A.V., Leontiev V.K. [Experimental studies of a dust collector-classifier], *Izvestiya vuzov. Himiya i himicheskaya tekhnologiya* [Izv. universities. Chemistry and Chem. Technology], 2014, vol. 57, no. 10, pp. 84-86. (In Russ., abstract in Eng.)

6. Yurovskaya M.A., Lebedev A.E., Leont'ev V.K. Improving the Operating Efficiency of a Dust Collector-Classifer, *Chemical and Petroleum Engineering*, 2019, vol. 55, no. 3-4, pp. 324-328, doi: 10.1007/s10556-019-00622-9.

7. Skoblo A.I., Tregubova I.A., Molokanov Yu.K. *Processy i apparaty neftepererabatyvayushey i neftekhimicheskoy promyshlennosti* [Processes and devices of the oil refining and petrochemical industry], Moscow: Chemistry, 1982, 584 p. (In Russ.).

Berechnung der Mindestpartikelgröße, die in der ersten Stufe des Staubabscheider-Klassifikators erfasst werden

Zusammenfassung: Es ist die Beschreibung des Funktionsprinzips des neuen hocheffizienten Staubsammler-Klassierers vorgestellt, der drei Stufen der Staub- und Gasstromreinigung umfasst. Es ist die Methode zur Berechnung der Mindestgröße der in der ersten Stufe dieser Vorrichtung eingefangenen Partikel vorgeschlagen, die auf den Gesetzen der Partikelablagerung unter laminaren Bedingungen basiert. Die Berechnung der Mindestgröße der eingefangenen Partikel – Gießereiabfälle – ist durchgeführt. Die Abhängigkeit der Mindestgröße der abgeschiedenen Partikel vom Gasdurchsatz sowie die Verteilung der Mindestgröße der abgeschiedenen Partikel über den Querschnitt der ersten Stufe sind ermittelt.

Calcul de la taille minimale des particules captées dans le premier étage du collecteur de poussière

Résumé: Est donnée la description du principe du fonctionnement du nouveau collecteur de poussière-classificateur à haut rendement comprenant trois étapes de nettoyage du flux de poussière et de gaz. Est proposée une méthode de calcul de la taille minimale des particules captées dans le premier étage de cet appareil, basée sur la conomérisation des particules en mode laminaire. Est calculée la taille minimale des particules capturées – déchets de la fonderie. La taille minimale des particules captées dépend du débit de gaz, ainsi que la répartition de la taille minimale des particules captées sur la section transversale du premier étage.

Авторы: *Юровская Мария Андреевна* – старший преподаватель кафедры «Химическая технология органических веществ»; *Леонтьев Валерий Константинович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Химическая технология органических веществ»; *Лебедев Антон Евгеньевич* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технологические машины и оборудование», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Ярославль, Россия.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СУШКИ НА СВОЙСТВА ПОРОШКОВОЙ ИНГАЛЯЦИОННОЙ КОМПОЗИЦИИ

Л. А. Щербак¹✉, Е. А. Петрикова¹, М. Г. Гордиенко¹,
Р. Р. Сафаров², А. Е. Щекотихин³

*Кафедры химического и фармацевтического инжиниринга (1),
shcherbakova.l.a@muctr.ru; органической химии (3),
департамент научно-технической политики (2),
ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени
Д. И. Менделеева», Москва, Россия*

Ключевые слова: активный фармацевтический ингредиент; методы планирования эксперимента; полимерные материалы; пролонгированное высвобождение; распылительная сушка; сухие ингаляционные порошки.

Аннотация: Предложен способ получения ингаляционных композиций, содержащих изониазид с пролонгированным высвобождением. Методом распылительной сушки получены сухие порошковые композиции. Для исследования как качественных, так и количественных факторов применен сложный план эксперимента: полный факторный эксперимент, совмещенный с двумя латинскими квадратами. Для оценки аэродинамических свойств полученных образцов выполнены аналитические и микроскопические исследования, исследования ингаляционной композиции на стабильность в стрессовых условиях. С помощью методов математической статистики выявлены наиболее значимые контролируемые параметры, определены оптимальные условия.

Введение

Ингаляционная доставка лекарств является одной из эффективных методик лечения заболеваний легких. Преимущество ингаляционной терапии по сравнению с другими путями введения – создание высокой концентрации лекарственных веществ непосредственно в очаге поражения дыхательной системы, при минимальных системных нежелательных эффектах.

Порошок для ингаляционного применения должен обладать определенными характеристиками и свойствами. Для достижения эффективного осаждения лекарственного средства в легких размер частиц должен попадать в диапазон от 1 до 5 мкм [1]. Однако частицы такого размера имеют высокую свободную энергию поверхности и тенденцию агломерироваться между собой или сцепляться с любыми поверхностями, с которыми они сталкиваются.

В качестве носителей при создании пролонгированных систем доставки лекарственных веществ могут быть использованы биологически совместимые полимеры синтетического и природного происхождения [2]. Наиболее часто для создания систем доставки лекарств пролонгированного действия используют сложные алифатические полиэфиры: полимолочную и полигликолевую кислоты, а также сополимеры молочной и гликолевой кислот, обладающие хорошей биодеструктурируемостью и биосовместимостью [3, 4]. Данные полимеры являются гид-

рофобными, что позволяет им удерживать инкапсулированный активный фармацевтический ингредиент (АФИ) и постепенно высвобождать его. Медленное высвобождение лекарства из микросфер, вводимых локально в легкое, способствует поддержанию как низкого уровня препарата в крови, так и высокого уровня препарата в альвеолярных макрофагах [5].

В целях повышения текучести порошков, предотвращения слеживаемости при хранении в состав часто вводят аминокислоты, в том числе лейцин. Благодаря гидрофобной природе кристаллической оболочки, препятствующей проникновению влаги, повышается физическая стабильность лекарственных средств. Также лейцин повышает выход продукта и улучшает растворимость плохо растворимых в воде АФИ [6]. Для получения пористой микрочастицы в качестве порообразователя на практике часто применяется бикарбонат аммония [7].

Получение микропорошков, пригодных для ингаляционного применения, возможно при помощи распылительной сушилки, параметры которой будут влиять на выход продукта и его характеристики.

Цель работы – исследование влияния состава и технологических параметров распылительной сушилки на свойства порошковой ингаляционной композиции.

Материалы и методы

Материалы

В экспериментальной работе для приготовления ингаляционной композиции использовались такие полимеры, как полимолочная кислота (ПМК), поликапролактон (ПКЛ) и сополимер полимолочной и гликолевой кислот (ПМГК). В водную фазу первичной эмульсии вводили карбонат аммония (пороген), изониазид (АФИ); полимеры растворяли в хлористом метиле. Для водной фазы вторичной эмульсии использовался раствор поливинилового спирта (ПВС), а также в ряде экспериментов – лейцин.

Методика приготовления порошковых ингаляционных композиций

Порошковая ингаляционная композиция готовится в два этапа: на *первом* – формируют суспензию (получают при отвердевании капель двойной эмульсии), которую сушат распылением на *втором* этапе.

Для получения двойной эмульсии готовятся растворы масляной и водной фаз. Раствор поливинилового спирта (1 масс. %) для водной фазы вторичной эмульсии готовят заранее, так как данному полимеру необходимо время для растворения. Раствор ставится на магнитную мешалку с подогревом (при 50 °С), на максимальное число оборотов, до формирования прозрачной жидкости. Для водной фазы первичной эмульсии готовится раствор карбоната аммония (пороген) с изониазидом. Карбонат аммония неустойчив уже при комнатной температуре, поэтому приготовление раствора происходит на ледяной бане. Также для первичной эмульсии растворяют требуемый полимер в хлористом метиле (масляная фаза).

В объем масляной фазы с полимером тонкой струйкой вливается водная фаза с порогами и активным веществом. Далее смесь обрабатывается ультразвуковым гомогенизатором на ледяной бане. Для формирования вторичной эмульсии в стакан с 1%-м раствором ПВС тонкой струйкой вливается первичная эмульсия, смесь гомогенизируется с помощью смесителя типа «фотор – статор». Для испарения легколетучего дихлорметана и отвердевания капель эмульсии емкость с образцом оставляют на магнитной мешалке на 2 ч с перемешиванием. Далее при заданных параметрах образец сушится распылением с помощью установки Mini Spray Dryer B-290 (Buchi, Швейцария) с образованием микропорошка. Полученные образцы собирают из сборника и упаковывают.

Планирование экспериментального исследования

Для повышения эффективности эксперимента и получения достоверных результатов целесообразно применять методы планирования эксперимента. Из-за большого числа влияющих факторов, как качественных, так и количественных, построен сложный план: полный факторный эксперимент, совмещенный с двумя латинскими квадратами. Для представления плана в упрощенном виде вводятся следующие обозначения: факторы, имеющие большее из значений обозначены «+1», меньшее значение – «-1». Для контролируемых параметров выбраны следующие уровни варьирования: концентрация порообразователя (0,5 % (1); 1 % (2); 1,5 % (3); 2 % (4)); тип полимера (ПМК (А), ПМГК (В), ПКЛ (С), ПКЛ : ПМК (D)); отношение водной и масляной фаз в первичной эмульсии (1/5 и 1/10); время обработки первичной эмульсии ультразвуком (60 и 30 с); интенсивность гомогенизации вторичной эмульсии (6000 и 3000 об/мин); длительность гомогенизации вторичной эмульсии (60 и 30 с); температура сушильного агента на входе в камеру (150 и 180 °С); расход сжатого воздуха, подаваемого на форсунку (601 и 473 л/ч). Поскольку составы растворов различались, соответственно различались их плотность и вязкость, поэтому для каждого эксперимента расход жидкости, подаваемый на сушку, при заданной мощности, измерялся индивидуально в процессе сушки.

Матрица планирования эксперимента представлена в табл. 1. Проведено 16 экспериментов, при этом эксперименты №№ 8 и 9 проведены в трех повторностях для оценки однородности дисперсии и дисперсии воспроизводимости.

Таблица 1

Матрица планирования эксперимента

№	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈
1	+	–	–	–	–	+	1	A
2	–	–	–	–	+	–	2	B
3	+	+	–	–	+	–	3	C
4	–	+	–	–	–	+	4	D
5	+	–	+	–	+	+	2	D
6	–	–	+	–	–	–	1	C
7	+	+	+	–	–	–	4	B
8	–	+	+	–	+	+	3	A
9	+	–	–	+	–	+	3	B
10	–	–	–	+	+	–	4	A
11	+	+	–	+	+	–	1	D
12	–	+	–	+	–	+	2	C
13	+	–	+	+	+	+	4	C
14	–	–	+	+	–	–	3	D
15	+	+	+	+	–	–	2	A
16	–	+	+	+	+	+	1	B

Характеризация полученных сухих порошковых композиций

Для всех полученных образцов определялся выход продукта и следующие характеристики: гранулометрический состав, остаточное влагосодержание, насыпная плотность, сыпучесть, угол естественного откоса, а также исследовалась стабильности порошка в стрессовых условиях.

Выход продукта η определен как отношение массы порошка, полученного после процесса распылительной сушки, к общей массе твердого вещества, добавленного для приготовления исходного раствора:

$$\eta = \frac{m_{\text{после сушки}}}{m_{\text{общ}}} 100\% . \quad (1)$$

Определение гранулометрического состава. Небольшое количество образца помещали на камеру Горяева. С помощью оптического микроскопа Micros MCX – 100 Cocus получили микрофотографии со стократным увеличением. Изображения частиц обрабатывались с помощью программного обеспечения ImageG. Для характеристики дисперсионного состава образцов использовали медианный диаметр, а также квантили D₁₀ и D₉₀.

Для визуализации поверхностной морфологии микрочастиц с активным веществом проведена сканирующая электронная микроскопия в центре коллективного пользования РХТУ им. Д. И. Менделеева.

Остаточное влагосодержание образцов определяли с помощью влагоанализатора Axis AGS500 при температуре 40 °С в автоматическом режиме.

Измерение насыпной плотности. Для установления значений насыпной плотности порошок помещался в микропробирку (эппендорф) объемом 1 мл. Насыпная плотность, г/см³, определялась по формуле как отношение массы материала m к занимаемому им объему V , включая поры между частицами (2):

$$\rho = \frac{m}{V} . \quad (2)$$

Угол естественного откоса – постоянный, трехмерный угол (относительно горизонтальной поверхности), сформированный конусообразной пирамидкой материала. Измерение значения угла естественного откоса проводят не менее чем в трех повторах при помощи угломера в трех плоскостях и выражают в угловых градусах.

Исследование стабильности порошка в стрессовых условиях. Процесс проверки образцов порошка на слеживаемость проводился следующим образом. Сначала осуществлялась подготовка образцов: для каждого образца заполнялись две желатиновые капсулы по 0,25 г образца. Каждая пара капсул помещалась в маленький конверт из фильтровальной бумаги и отправлялась в климатическую камеру. Испытания определения слеживаемости порошков проводились при температуре 40 °С и влажности 70 %. Затем через 14 дней образцы извлекались из климатической камеры и проводилась повторная характеристика образцов.

Исследование влияния лейцина на стабильность состава. Включение лейцина в рецептуру ингаляторного порошка может существенно изменить структуру получаемых частиц, поэтому проведено исследование влияния добавления лейцина в суспензию на характеристики продукта распылительной сушки. Выполнено четыре эксперимента, в которых использовалась различная концентрация лейцина в объеме водной фазы 0,125, 0,25, 0,5 и 1 %. Лейцин вводился в раствор ПВС. Для полученных порошков проводились аналитические и микроскопические исследования.

Статистический анализ результатов. Для определения интенсивности влияния исследуемых факторов на характеристики микропорошков проведен статистический анализ результатов в соответствии с методикой обработки результатов сложного плана, приведенной в учебнике [8]. В ходе анализа рассчитаны эффекты всех факторов, а также проведена оценка их значимости.

Поскольку многокритериальные задачи могут не иметь локального оптимума, то в этом случае требуется осуществить переход к однокритериальной задаче (свертке критериев), например, по методу утопической точки [8].

Результаты и обсуждение

Получено 16 образцов в соответствии с матрицей планирования (см. табл. 1). Аналитические исследования порошков выполнены сразу после проведения процесса распылительной сушки, а также спустя две недели хранения в стрессовых условиях ($T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$; $W = 70\text{ }\%$). По результатам, приведенным в табл. 2, сделан вывод, что наибольший выход продукта получен при использовании смеси полимеров поликапролактона и полимолочной кислоты и подаче на форсунку сжатого воздуха с расходом 601 л/ч.

Полученные порошки обладают высокой текучестью, поскольку насыпная плотность для всех образцов составила менее 0,6 г/см³, а угол откоса – менее 50°. Остаточное влагосодержание в образцах не превысило 5 масс. %, а после испытаний в стрессовых условиях – 7 масс. %.

Таблица 2

Анализ полученных порошков до и после хранения в стрессовых условиях

Параметр	ПМК		ПКЛ	
Выход, %	18,6...38,6		22,5...42,0	
Хранение в стресс-условиях	До	После	До	После
Насыпная плотность, г/см ³	0,16...0,29	0,14...0,24	0,25...0,34	0,19...0,25
Угол откоса, °	31...40	34...50	36...45	37...45
Остаточное влагосодержание, %	2,6...4,7	2,9...7,0	1,8...3,8	2,65,7
Параметр	ПМГК		ПКЛ : ПМК (50 : 50)	
Выход, %	15,7...47,0		26,4...70,81	
Хранение в стресс-условиях	До	После	До	После
Насыпная плотность, %	0,21...0,25	0,1...0,2	0,34...0,43	0,24...0,26
Угол откоса, °	44...50	48...55	39...45	37...50
Остаточное влагосодержание, %	1,4...3,5	2,6...7,0	1,5...4,6	2,6...5,7

При исследовании стабильности установлено, что полученные ингаляционные композиции склонны к агломерации. Например, после хранения в условиях повышенных значений температуры и влажности уже в течение двух недель размеры частиц порошков №№ 3, 10, 13, 15 увеличились в размере в 2 – 4 раза.

Образцы, высушенные при температуре сушильного агента на входе в камеру 180 °С и расходе сжатого воздуха 601 л/ч, независимо от выбранного полимера, получились более стабильными – их характеристики изменились в меньшей степени.

На рисунке 1 представлено распределение частиц по размерам D₁₀, D₅₀, D₉₀. Большинство образцов (кроме №№ 6, 7, 11, 14) имеют размеры, пригодные для ингаляционного применения. Наиболее узкий диапазон распределения частиц по размерам у образцов №№ 4, 5, 8, 9, 12 и 13.

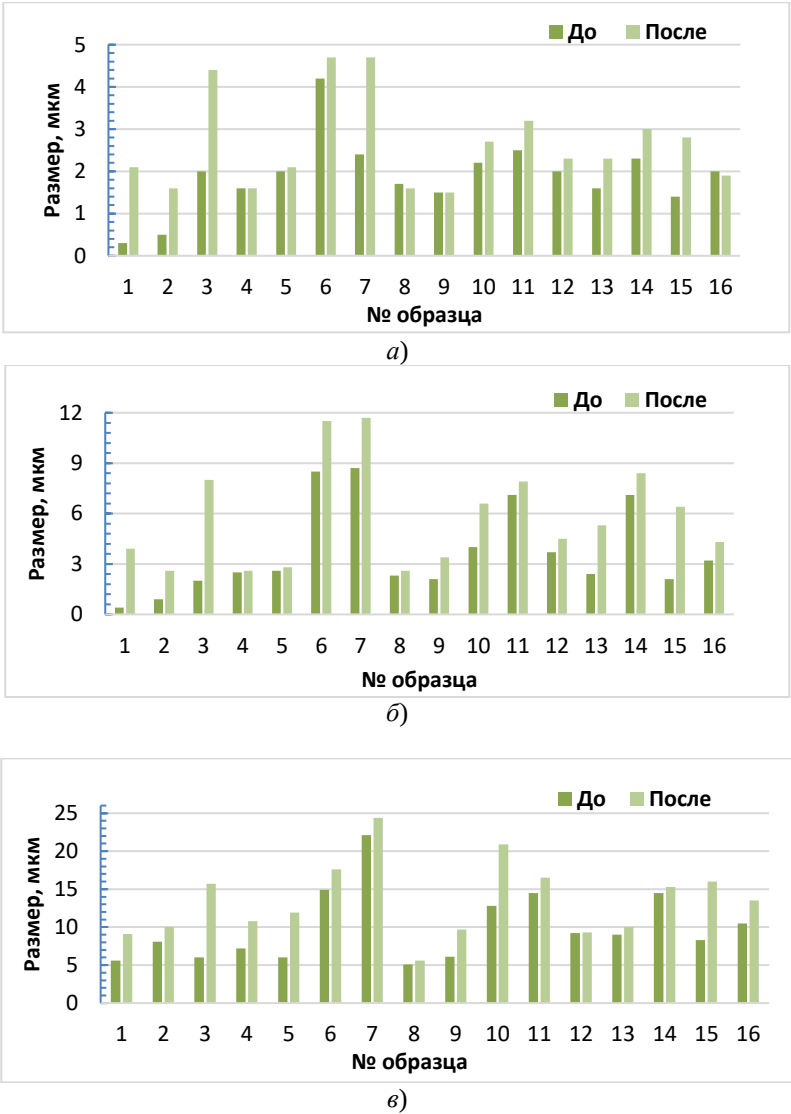


Рис. 1. Распределение частиц по размерам D₁₀, D₅₀, D₉₀ (а – в соответственно) до и после хранения в стрессовых условиях

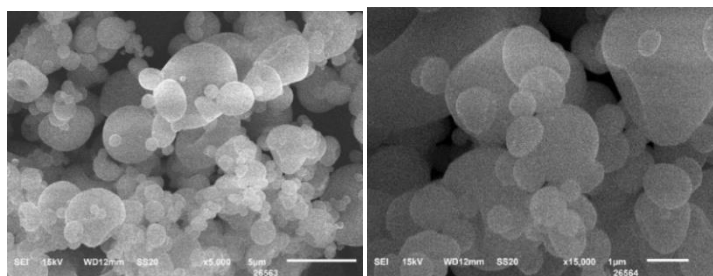


Рис. 2. Сканирующие электронные микрофотографии изображений образца № 1 с АФИ до исследования в стрессовых условиях
(фотографии выполнены на оборудовании ЦКП РХТУ им. Д. И. Менделеева)

На рисунке 2 представлены фотографии частиц образца № 1 со сканирующего электронного микроскопа. Можно увидеть, что полученные порошки содержат как более мелкие частицы, так и более крупные. Частицы имеют сферическую форму с гладкой поверхностью.

Оценка значимости факторов, введенных в план на двух уровнях, проводилась с использованием критерия Стьюдента. Анализ полученных значений позволяет сделать вывод, что на остаточную влажность и угол откоса порошковой композиции не влияет ни один из эффектов в данном диапазоне исследования. Расход сжатого воздуха, подаваемого на форсунку, значительно влияет на выход продукта, остальные эффекты незначимы для данного фактора.

Интенсивность гомогенизации вторичной эмульсии и расход сжатого воздуха, подаваемого на форсунку, значительно влияют на медианный размер порошковой композиции, остальные эффекты незначимы.

Оценка значимости влияния факторов, введенных в план на четырех уровнях, проверялась с использованием множественного критерия Дункана. Анализ значимости различия эффектов показывает, что тип используемого полимера и концентрация порообразователя оказывают существенное влияние на выход продукта и медианный размер и практически не имеют влияния на остаточную влажность и угол откоса.

В результате проведенного дисперсионного и факторного анализа установлены оптимальные параметры получения порошков для ингаляции: отношение водной и масляной фаз в первичной эмульсии – 1/10; время обработки первичной эмульсии ультразвуком – 60 с; интенсивность гомогенизации вторичной эмульсии – 3000 об/мин; длительность гомогенизации вторичной эмульсии – 30 с; температура сушильного агента на входе в камеру – 150 °С; расход сжатого воздуха на форсунку – 601 л/ч; концентрация порообразователя – 2 %; тип полимера – ПКЛ : ПМК (50 : 50) (условия соответствуют эксперименту № 4).

Влияние лейцина на стабильность состава. Для исследования влияния лейцина на характеристики ингаляционных порошков использованы состав и параметры получения образца № 7 (см. табл. 1), который имел наихудшие характеристики. Концентрация лейцина варьировалась от 0 до 1 % (табл. 3).

Результаты, представленные в табл. 3, показывают, что введение в состав 0,25 % лейцина в эксперименте № 3Л, привело к увеличению выхода продукта в 1,6 раза, по сравнению с экспериментом № 1Л, в котором данная добавка отсутствует. Дальнейшее повышение концентрации лейцина не оказывает влияние на выход продукта. С увеличением концентрации лейцина в порошковой композиции наблюдается уменьшение размера частиц и остаточного влагосодержания. В то же самое время наблюдается увеличение насыпной плотности и уменьшение угла откоса, что говорит о положительном влиянии лейцина на характеристики порошка для ингаляций.

Таблица 3

Анализ образцов с АФИ после хранения в стрессовых условиях

Экспе- римент	Лейцин, масс. %	Выход продукта, %	Характеристики образцов*			
			Медианный размер, D ₅₀	Остаточное влагосодержание, %	Угол откоса, °	Насыпная плотность, г/см ³
1Л	0	20	11,7	3,6	52	0,10
2Л	0,125	16 ± 1	11,2	3,5	58	
3Л	0,25	32 ± 1	10,3	3,3	43	
4Л	0,5	31 ± 1	9,2	2,9	45	0,11
5Л	1	32 ± 1	5,4	2,1	41	

* Образцы исследовали на стабильность в стрессовых условиях в течение двух недель (T = 40 °C; W = 70 %).

Заключение

Показана принципиальная возможность получения порошков для ингаляций с пролонгированным высвобождением АФИ методом распылительной сушки суспензии, однако выявлены такие проблемы, как низкий выход продукта для определенных комбинаций состава и условий формирования суспензии и ее распылительной сушки, склонность к агломерации в условиях повышенных влажности и температуры. Методом утопической точки определены оптимальные параметры. На примере образца № 7 апробировано использование лейцина в качестве стабилизатора, способствующего повышению выхода порошка и его стабилизации при хранении.

Исследования проведены при финансовой поддержке Министерство науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (проект FSSM-2022-0004).

Список литературы

1. Thomas, R. J. Particle Size and Pathogenicity in the Respiratory Tract / R. J. Thomas // Virulence. – 2013. – Vol. 4, No. 8. – Pp. 847 – 858. doi: 10.4161/viru.27172
2. Полимеры для систем доставки лекарственных веществ пролонгированного действия (обзор). Полимеры и сополимеры молочной и гликолевой кислот / С. А. Кедик, Е. С. Жаворонок, И. П. Седишев [и др.] // Фармацевтическая технология. – 2013. – № 2(3). – С. 18 – 35.
3. Exploring Inhalable Polymeric Dry Powders for Anti-Tuberculosis Drug Delivery / M. S. Miranda, M. T. Rodrigues, R. M. A. Domingues, E. Torrado, R. L. Reis, J. Pedrosa, M. E. Gomes // Materials Science & Engineering. – 2018. – P. 1090 – 1103. doi: 10.1016/j.msec.2018.09.004
4. Akagi, T. Biodegradable Nanoparticles as Vaccine Adjuvants and Delivery Systems: Regulation of Immune Responses by Nanoparticle-Based Vaccine / T. Akagi, M. Baba, M. Akashi // Advances in Polymer Science. – 2012. – Vol. 247, No.1. – P. 31 – 64. doi:10.1007/12_2011_150
5. Particle Engineering in Dry Powders for Inhalation / R. Scherließ, S. Bock, N. Bungert, A. Neustock, L. Valentin // European Journal of Pharmaceutical Sciences. – 2022. – Vol. 172, No. 7. – P. 106158. doi:10.1016/j.ejps.2022.106158

6. Alhajj, N. Leucine as an Excipient in Spray Dried Powder for Inhalation / N. Alhajj, N. J. O'Reilly, H. Cathcart // *Drug Discovery Today*. – 2021. – Vol. 26, No.10. – P. 2384 – 2396. doi:10.1016/j.drudis.2021.04.009

7. A Pathway From Porous Particle Technology Toward Tailoring Aerogels for Pulmonary Drug Administration / D. Thoa, C. López-Iglesias, P. K. Szewczyk [et al.] // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. – 2021. – Vol. 9. – P. 671381. doi:10.3389/fbioe.2021.671381

8. Ахназарова, С. Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии : учеб. пособие для хим.-технолог. спец. вузов / С. Л. Ахназарова, В. В. Кафаров. – М. : Высшая школа, 1985. – 327 с.

A Study of the Influence of Polymer Matrix and Process Parameters of Spray Drying on the Properties of Powder Inhalation Composition

L. A. Shcherbakova^{1✉}, E. A. Petrikova¹, M. G. Gordienko¹,
R. R. Safarov², A. E. Shchekotikhin³

*Departments: Chemical and Pharmaceutical Engineering (1), shcherbakova.l.a@muctr.ru;
Organic Chemistry (3); Department of Scientific and Technical Policy (2),
D. I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia*

Keywords: active pharmaceutical ingredient; experiment planning methods; polymeric materials; sustained release; spray drying; dry inhalation powders.

Abstract: A method for producing inhalation compositions containing sustained release isoniazid is proposed. Using the methods of mathematical statistics, the most significant controlled parameters were identified, and a complex plan was constructed, combined with two Latin squares. Dry powder compositions were prepared by spray drying. To assess the aerodynamic properties of the obtained samples, analytical and microscopic studies were performed. The inhalation composition was studied for stability under stress conditions, and the effect of leucine on its structure was studied.

References

1. Thomas R.J. Particle size and pathogenicity in the respiratory tract, *Virulence*, 2013, vol. 4, no. 8, pp. 847-858. doi: 10.4161/viru.27172
2. Kedik S.A., Zhavoronok E.S., Sedishev I.P., Panov A.V., Suslov V.V., Petrova E.A., Sapelnikov M.D., Shatalov D.O., Eremin D.V. [Polymers for long-acting drug delivery systems (review). Polymers and copolymers of lactic and glycolic acids], *Farmatsevticheskaya tekhnologiya* [Pharmaceutical technology], 2013, no. 2(3), pp. 18-35 (In Russ., abstract in Eng.)
3. Miranda M.S., Rodrigues M.T., Domingues R.M.A., Torrado E., Reis R. L., Pedrosa J., Gomes M.E. Exploring inhalable polymeric dry powders for anti-tuberculosis drug delivery, *Materials Science & Engineering*, 2018, pp. 1090-1103. doi: 10.1016/j.msec.2018.09.004
4. Akagi T., Baba M., Akashi M. Biodegradable nanoparticles as vaccine adjuvants and delivery systems: regulation of immune responses by nanoparticle-based vaccine, *Advances in Polymer Science*, 2012, vol. 247, no.1, pp. 31–64. doi: 10.1007/12_2011_150
5. Scherließ R., Bock S., Bungert N., Neustock A., Valentin L. Particle engineering in dry powders for inhalation, *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2022, vol. 172, no. 7, pp. 106158. doi:10.1016/j.ejps.2022.106158

6. Alhajj N., O'Reilly N.J., Cathcart H. Leucine as an excipient in spray dried powder for inhalation, *Drug Discovery Today*, 2021, vol. 26, no.10, pp. 2384-2396. doi:10.1016/j.drudis.2021.04.009

7. Thoa D., López-Iglesias C., Szewczyk P.K., Stachewicz U., Barros J., Alvarez-Lorenzo C., Alnaief M., García-González C.A. A Pathway From Porous Particle Technology Toward Tailoring Aerogels for Pulmonary Drug Administration, *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2021, vol. 9, doi:10.3389/fbioe.2021.671381

8. Akhnazarova S.L., Kafarov V.V. *Metody optimizatsii eksperimenta v khimicheskoy tekhnologii : ucheb. posobiye dlya khim.-tekhnolog. spets. vuzov* [Methods for optimizing experiments in chemical technology: A textbook for chemical engineering spec. at universities], Moscow: Higherschool; 1985. 327 p. (In Russ.)

Untersuchung des Einflusses der Polymermatrix und technologischer Parameter der Sprühtrocknung auf die Eigenschaften der Pulver-Inhalationszusammensetzung

Zusammenfassung: Es ist ein Verfahren zur Herstellung von Inhalationspräparaten vorgeschlagen, die Isoniazid mit verlängerter Freisetzung enthalten. Trockene Pulverzusammensetzungen sind durch Sprühtrocknung erhalten. Zur Untersuchung sowohl qualitativer als auch quantitativer Faktoren war ein komplexer Versuchsplan angewandt: ein Vollfaktor-Experiment in Kombination mit zwei lateinischen Quadraten. Zur Abschätzung der aerodynamischen Eigenschaften der erhaltenen Proben sind analytische und mikroskopische Untersuchungen durchgeführt sowie Studien über die Inhalationszusammensetzung auf Stabilität unter Stressbedingungen. Mit Hilfe der Methoden der mathematischen Statistik sind die wichtigsten Kontrollparameter ermittelt und optimale Bedingungen bestimmt.

Étude de l'effet de la matrice polymère et des paramètres technologiques des propriétés de séchage par pulvérisation sur la composition inhalée en poudre

Résumé: Est proposée la méthode de préparation de la compositions inhalées contenant de l'isoniazide à libération prolongée. Par le séchage à pulvérisation, sont obtenues des compositions en poudre sèche. Pour étudier à la fois les facteurs qualitatifs et quantitatifs, est appliqué un plan d'expérience complexe: expérience factorielle complète combinée avec deux carrés latins. Pour évaluer les propriétés aérodynamiques des échantillons obtenus, sont effectuées des études analytiques et microscopiques; est étudiée la composition par inhalation pour la stabilité dans des conditions stressantes. À l'aide de méthodes de statistiques mathématiques, sont identifiés les paramètres contrôlés les plus significatifs, sont déterminées les conditions optimales.

Авторы: *Щербакова Лариса Александровна* – аспирант кафедры химического и фармацевтического инжиниринга; *Петрикова Екатерина Александровна* – магистрант; *Гордиенко Мария Геннадьевна* – доктор технических наук, профессор кафедры химического и фармацевтического инжиниринга; *Сафаров Руслан Рафигоглы* – кандидат технических наук, директор департамента научно-технической политики; *Щекотихин Андрей Егорович* – доктор химических наук, профессор РАН, заведующий кафедрой органической химии, ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева», Москва, Россия.

**ВЛИЯНИЕ РЕЖИМНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ И КОНСТРУКТИВНЫХ
ПАРАМЕТРОВ ОБОРУДОВАНИЯ НА ЭНЕРГОЗАТРАТЫ
И ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ДЛИННОМЕРНЫХ
РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК**

М. В. Соколов^{1✉}, П. С. Беляев², Д. В. Туляков³

*Кафедры: «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении» (1),
msok68@mail.ru, «Материалы и технология» (2), ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия;
ТОГАПОУ «Тамбовский бизнес-колледж» (3), Тамбов, Россия*

Ключевые слова: длинномерные профильные заготовки; критерии оптимизации; критерий подвулканизации; линии уровня; параметры управления; полезная мощность; резинотехнические изделия; суммарный сдвиг в каналах шнека.

Аннотация: В целях выбора параметров управления при оптимизации процесса экструзии и конструкции оборудования для переработки резиновых смесей в длинномерные профильные заготовки установлен характер и вес относительного влияния основных технологических и конструктивных параметров между собой и на функции состояния, таких как полезная мощность, производительность шнековой машины, критерий подвулканизации и суммарный сдвиг в каналах шнека, то есть исследована их совместная корреляция.

Введение

Построение линий уровня функций состояния позволяет провести оценку и выбор параметров управления для исследования и оптимизации процесса и конструкции оборудования для переработки резиновых смесей при изотермическом и неизотермическом режимах экструзии. Анализируя линии уровня функций состояния и рассматривая влияние каждого из основных технологических и конструктивных параметров на величины изменения функций состояния, то есть определяя их вес, можно выбрать варьируемые в качестве параметров управления из таких как: угловая скорость шнека ω , угол наклона винтовой линии нарезки шнека φ , глубина винтового канала шнека h , его наружный диаметр D и длина нарезной части L , зазор между гребнем шнека и внутренней поверхностью материального цилиндра $\delta_{\text{ц}}$, ширина гребня шнека e .

В качестве функций состояния принимали полезную мощность N , производительность шнековой машины Q , критерий подвулканизации J_B [1] и суммарный сдвиг в каналах шнека $\gamma_{\text{ш}}$ [2], которые зависят от конструктивных и технологических параметров по уравнениям математической модели, изложенной в книге [3].

Оценка взаимного относительного влияния основных технологических и конструктивных параметров процесса и оборудования экструзии резиновых смесей посредством анализа линий уровня функций состояния

Влияние конструктивных и технологических параметров шнековой (червячной) машины проведено на примере экструзии резиновой смеси НО-68-1 со следующими теплофизическими и реологическими параметрами: $\rho = 1200 \text{ кг/м}^3$; $\lambda = 0,22 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$; $c = 2300 \text{ Дж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}$; при изотермическом ($m_0 = 100 \text{ кПа} \cdot \text{с}^n$; $n = 0,2$; $T_{\text{см.вх}} = T_{\text{см.вых}} = 358 \text{ К}$; $T_{\text{ц}} = 358 \text{ К}$) и неизотермическом режимах экструзии ($m_0 = 600 \text{ кПа} \cdot \text{с}^n$; $n = 0,2$; $T_{\text{см.вх}} = 323 \text{ К}$; $T_{\text{ц}} = 358 \text{ К}$; $\Delta P = 20 \text{ МПа}$).

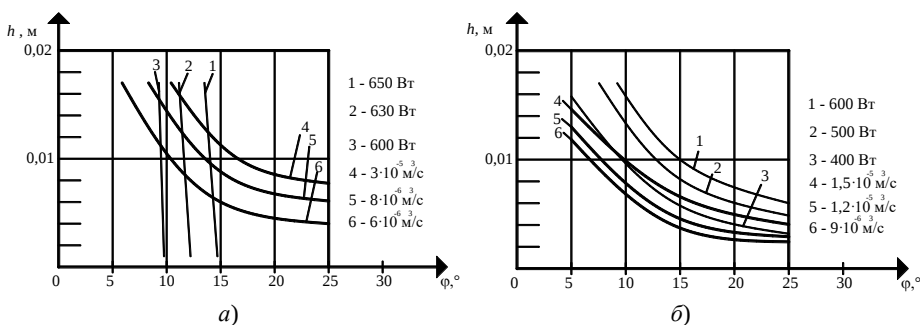
Выбор параметров управления проводился с помощью линий уровня функций состояния, построение которых осуществлялось при поддержке программного обеспечения для ЭВМ, разработанного на основе математической модели процесса экструзии резиновых смесей [3, 4].

На рисунке 1 показано влияние угла наклона винтовой линии φ и глубины винтового канала червяка h на полезную мощность N , производительность Q . Очевидно, что изменение угла наклона нарезки φ на 33 % в области своих реальных значений ($15 \dots 20^\circ$) увеличивает полезную мощность N на 20 % (см. рис. 1, а). Увеличение глубины винтового канала червяка h ($0,004 \dots 0,006 \text{ м}$) на 50 % приводит к увеличению полезной мощности N на 25 % (кривые 1 – 3), так как с увеличением глубины винтового канала h захватывается больше перерабатываемого материала, и, следовательно, требуется большее усилие на транспортирование резиновой смеси вдоль канала червяка. Как видно из рис. 1, б, угол наклона нарезки φ в области своих реальных значений ($15 \dots 20^\circ$) и глубина винтового канала h ($0,004 \dots 0,008 \text{ м}$) незначительно влияют на изменение полезной мощности N (2 – 8 %), так как с изменением угла наклона нарезки φ гидравлическое сопротивление материала в винтовом канале практически не изменяется.

Производительность червячной машины Q в большей степени зависит от глубины винтового канала h , чем от угла наклона нарезки φ (см. рис. 1). Причем, чем больше глубина винтового канала h (на 33 %), тем больше производительность Q (на 30 %), так как с увеличением h объем винтового канала также увеличивается, а значит, транспортируется больше резиновой смеси в единицу времени. При увеличении угла наклона нарезки φ (на 33 %) увеличивается шаг нарезки t червяка, а также производительность Q (на 14 %), так как за один оборот червяка резиновая смесь проходит вдоль оси червяка большее расстояние и, следовательно, быстрее выходит из материального цилиндра.

На рисунке 2 показано влияние угла наклона винтовой линии φ и глубины винтового канала червяка h на критерий подвулканизации J_B и суммарный сдвиг в каналах шнека $\gamma_{\text{ш}}$. Критерий подвулканизации J_B в большей степени зависит от угла наклона нарезки φ , чем от глубины винтового канала h , и изменяется незначительно (на 10 %), так как производительность незначительно зависит от угла наклона нарезки φ (см. рис. 2).

Суммарный сдвиг в каналах шнека $\gamma_{\text{ш}}$ в большей степени зависит от глубины винтового канала h , чем от угла наклона нарезки φ (см. рис. 2). Причем, чем больше глубина винтового канала h (на 33 %), а, следовательно, меньше скорость сдвига $\dot{\gamma}$, тем меньше суммарный сдвиг $\gamma_{\text{ш}}$ (на 50 %), что связано с увеличением производительности Q и уменьшением времени пребывания резиновой смеси в материальном цилиндре, а чем больше угол наклона нарезки φ (на 33 %), тем больше суммарный сдвиг $\gamma_{\text{ш}}$ (на 10 %).



**Рис. 1. Линии уровня функций мощности N (1 – 3) и производительности Q (4 – 6) для $D = 0,032 \text{ м}$; $\omega = 2,1 \text{ с}^{-1}$ (20 мин^{-1}); $L = 0,32 \text{ м}$; $e = 0,0032 \text{ м}$; $\delta_n = 0,001 \text{ м}$:
 а – изотермический режим; б – неизомермический режим экструзии**

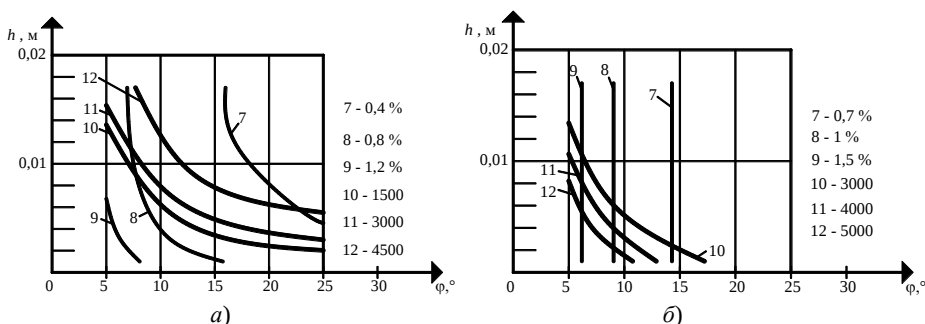
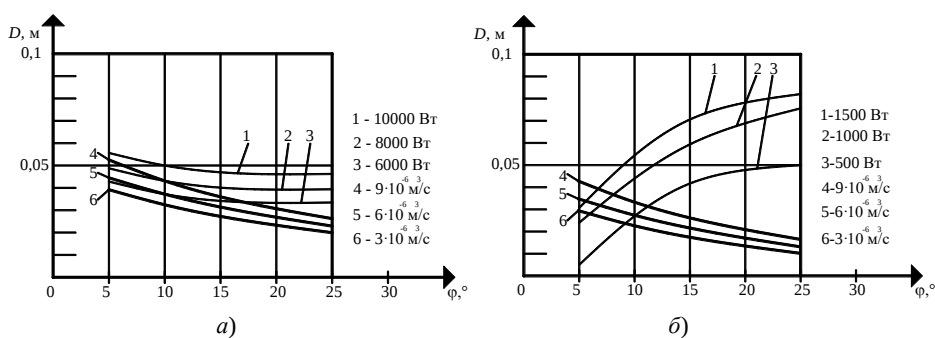


Рис. 2. Линии уровня функций критерия подвулканизации JB (7 – 9) и суммарного сдвига $\gamma_{ш}$ (10 – 12) для $D = 0,032 \text{ м}$; $\omega = 2,1 \text{ с}^{-1}$ (20 мин^{-1}); $L = 0,32 \text{ м}$; $e = 0,0032 \text{ м}$; $\delta_n = 0,001 \text{ м}$: а – изотермический режим; б – неизомермический режим экструзии

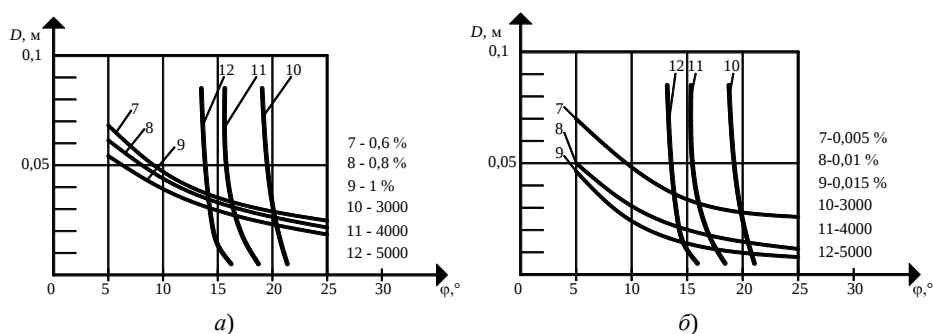
На рисунке 3 показано влияние угла наклона винтовой линии ϕ и наружного диаметра D червяка на полезную мощность N , производительность Q . Угол наклона винтовой линии червяка ϕ в области своих реальных значений, по сравнению с наружным диаметром червяка D , влияет незначительно на изменение полезной мощности N . Причем, увеличение наружного диаметра червяка D на 33 % приводит к увеличению полезной мощности N на 60 % (кривые 1 – 3), так как увеличивается гидравлическое сопротивление материала в винтовом канале червяка и, следовательно, увеличиваются силы трения между резиновой смесью и материалом цилиндра, а также интенсивность сдвиговой деформации перерабатываемого материала, что приводит к увеличению мощности, расходуемой на транспортирование резиновой смеси вдоль канала, и мощности диссипации. Увеличение угла наклона нарезки ϕ на 33 % приводит к увеличению полезной мощности N при изотермическом и неизомермическом режимах соответственно на 20 % (см. рис. 3, а) и 5 % (см. рис. 3, б).

Производительность червячной машины Q в большей степени зависит от наружного диаметра червяка D , чем от угла наклона нарезки ϕ (см. рис. 3). Причем, чем больше наружный диаметр червяка D (на 33 %), тем больше производительность Q (на 200 %) (кривые 4 – 6), что объясняется увеличением объема винтового канала, а значит, транспортируется больше резиновой смеси в единицу времени. Увеличение угла наклона нарезки ϕ на 33 % приводит к увеличению производительности Q на 100 %.

На рисунке 4 показано влияние угла наклона винтовой линии ϕ и наружного диаметра D червяка на критерий подвулканизации JB и суммарный сдвиг в каналах шнека $\gamma_{ш}$.



**Рис. 3. Линии уровня функций мощности N (1 – 3) и производительности Q (4 – 6) для $H = 0,004 \text{ м}$; $\omega = 3,14 \text{ с}^{-1}$ (30 об/мин); $L = 0,32 \text{ м}$; $e = 0,0032 \text{ м}$; $\delta_d = 0,001 \text{ м}$:
а – изотермический режим; б – неизомермический режим экструзии**



**Рис. 4. Линии уровня функций критерия подвулканизации J_B (7 – 9) и суммарного сдвига $\gamma_{ш}$ (10 – 12) для $H = 0,004 \text{ м}$; $\omega = 3,14 \text{ с}^{-1}$ (30 об/мин); $L = 0,32 \text{ м}$; $e = 0,0032 \text{ м}$; $\delta_d = 0,001 \text{ м}$:
а – изотермический режим; б – неизомермический режим экструзии**

Критерий подвулканизации J_B в большей степени зависит от наружного диаметра червяка D , чем от угла наклона нарезки φ , и изменяется незначительно (см. рис. 4). При увеличении наружного диаметра червяка D на 33 % критерий подвулканизации J_B уменьшается на 60 %, так как производительность Q увеличивается, что приводит к уменьшению времени пребывания резиновой смеси в материальном цилиндре.

Суммарный сдвиг в каналах шнека $\gamma_{ш}$ в большей степени зависит от угла наклона нарезки φ , чем от наружного диаметра червяка D (рис. 5). Причем, чем больше угол наклона нарезки φ (на 33 %), тем меньше суммарный сдвиг $\gamma_{ш}$ (на 50 %), что связано с увеличением производительности Q и уменьшением времени пребывания резиновой смеси в материальном цилиндре как для изотермического, так для и неизомермического режимов экструзии резиновых смесей. На рисунке 5 показано влияние угла наклона винтовой линии φ и угловой скорости ω червяка на полезную мощность N , производительность Q .

Угол наклона нарезки φ в области своих реальных значений, по сравнению с угловой скоростью ω , влияет незначительно на изменение полезной мощности N . Причем, увеличение угловой скорости ω на 33 % приводит к увеличению полезной мощности N на 50 % (кривые 1 – 3), так как увеличивается скорость сдвига (интенсивность сдвиговых деформаций) в перерабатываемом материале и, следовательно, увеличиваются силы трения между резиновой смесью и материалом цилиндра. Изменение угла наклона нарезки φ на 33 % при изотермическом и неизомермическом режимах приводит к изменению полезной мощности N на 25 (см. рис. 5, а) и 20 % (см. рис. 5, б) соответственно.

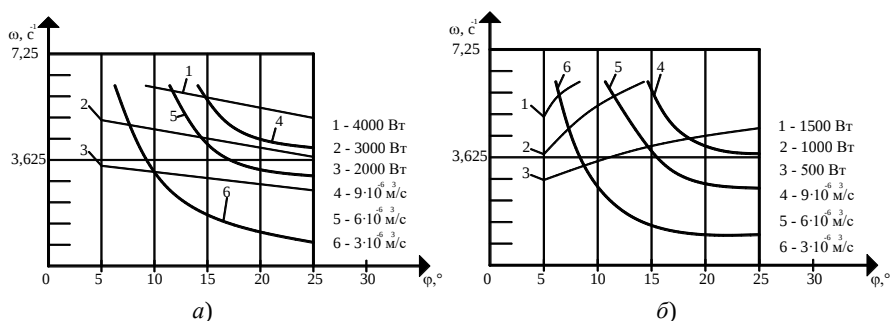


Рис. 5. Линии уровня функций мощности N (1 – 3), производительности Q (4 – 6) для $H = 0,006$ м; $D = 0,032$ м; $L = 0,32$ м; $e = 0,0032$ м; $\delta_n = 0,001$ м: а – изотермический режим; б – неизомермический режим экструзии

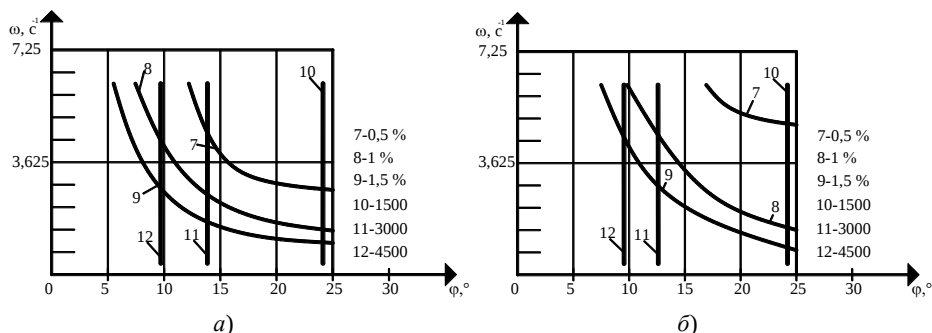


Рис. 6. Линии уровня функций критерия подвулканизации J_B (7 – 9) и суммарного сдвига $\gamma_{ш}$ (10 – 12) для $H = 0,006$ м; $D = 0,032$ м; $L = 0,32$ м; $e = 0,0032$ м; $\delta_n = 0,001$ м: а – изотермический режим; б – неизомермический режим экструзии

Производительность червячной машины Q (см. рис. 5) также в большей степени зависит от угловой скорости шнека ω , чем от угла наклона нарезки ϕ в области своих реальных значений. Причем, чем больше угловая скорость шнека ω (на 33 %), тем больше производительность Q (на 100 %) (кривые 4 – 6), что объясняется увеличением скорости продвижения резиновой смеси по винтовым каналам. Изменение угла наклона нарезки ϕ на 33 % приводит к изменению производительности Q при изотермическом и неизомермическом режимах на 20 (см. рис. 5, а) и 15 % (см. рис. 5, б) соответственно.

На рисунке 6 показано влияние угла наклона винтовой линии ϕ и угловой скорости шнека ω на критерий подвулканизации J_B и суммарный сдвиг в каналах шнека $\gamma_{ш}$. Критерий подвулканизации J_B в большей степени зависит от угловой скорости шнека ω , чем от угла наклона нарезки ϕ . При увеличении угловой скорости шнека ω на 33 % критерий подвулканизации J_B уменьшается на 70 %, так как производительность Q увеличивается, что приводит к уменьшению времени пребывания резиновой смеси в материальном цилиндре и, следовательно, меньшей ее подвулканизации как для изотермического, так и для неизомермического режимов экструзии резиновых смесей.

Суммарный сдвиг в каналах шнека $\gamma_{ш}$ в большей степени зависит от угла наклона нарезки ϕ , чем от угловой скорости шнека ω (см. рис. 6). Причем, чем больше угол наклона нарезки ϕ (на 33 %), тем меньше суммарный сдвиг в каналах шнека $\gamma_{ш}$ (на 25 %), что связано с увеличением производительности Q и уменьшением времени пребывания резиновой смеси в материальном цилиндре как для изотермического, так и неизомермического режимов экструзии резиновых смесей.

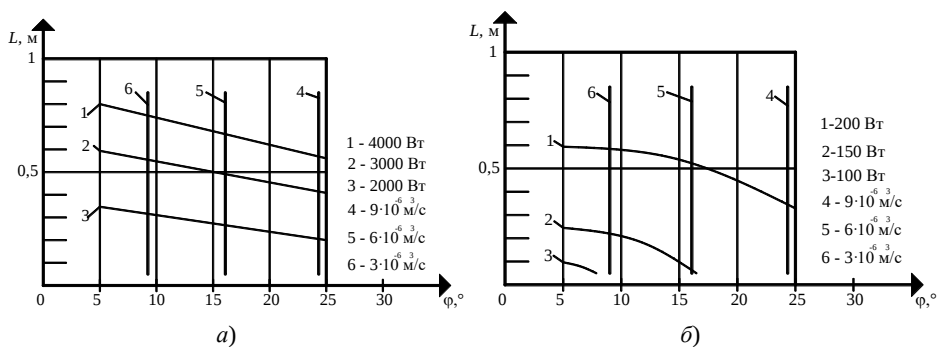


Рис. 7. Линии уровня функций мощности N (1 – 3) и производительности Q (4 – 6) для $H = 0,006$ м; $D = 0,032$ м; $\omega = 5,2$ с⁻¹ (50 об/мин); $e = 0,0032$ м; $\delta_n = 0,001$ м: а – изотермический режим; б – неизомермический режим экструзии

На рисунке 7 показано влияние угла наклона винтовой линии φ и длины нарезной части L червяка на полезную мощность N и производительность Q . Как видно, угол наклона нарезки φ по сравнению с длиной нарезки червяка L влияет на изменение полезной мощности N незначительно, чем больше угол наклона нарезки φ (на 33 %) в области своих реальных значений, тем больше полезная мощность N (на 8 %).

Увеличение длины нарезки червяка L на 33 % повышает полезную мощность N на 25 % (кривые 1 – 3), так как растет сопротивление материала в винтовом канале червяка, что требует больше энергии (полезной мощности) на преодоление этого сопротивления.

Производительность Q не зависит от изменения длины нарезки червяка L , что объясняется изменением насосного эффекта, и в большей степени зависит от угла наклона нарезки φ . Причем, чем больше угол наклона нарезки φ (на 33 %), тем больше производительность Q (на 36 %) (см. рис. 7, кривые 4 – 6). Изменение длины нарезки червяка L на 33 % не приводит к изменению производительности Q (см. рис. 7) как для изотермического, так и для неизомермического режимов экструзии резиновых смесей.

На рисунке 8 показано влияние угла наклона винтовой линии φ и длины нарезной части L червяка на критерий подвулканизации J_B и суммарный сдвиг в каналах шнека $\gamma_{ш}$. Критерий подвулканизации J_B в большей степени зависит от длины нарезки червяка L , чем от угла наклона нарезки φ . Увеличение длины нарезки червяка L (на 33 %) повышает критерий подвулканизации J_B (на 42 %), так как увеличивается время пребывания резиновой смеси в материальном цилиндре. Увеличение угла наклона нарезки φ на 33 % приводит к уменьшению критерия подвулканизации J_B на 17 %, так как увеличивается производительность Q и, следовательно, уменьшается время пребывания резиновой смеси в материальном цилиндре (см. рис. 8) как для изотермического, так и неизомермического режимов экструзии резиновых смесей.

Суммарный сдвиг в каналах шнека $\gamma_{ш}$ в большей степени зависит от длины нарезки червяка L , чем от угла наклона нарезки φ (см. рис. 8). Причем, чем больше длина нарезки червяка L (на 33 %), тем больше суммарный сдвиг в каналах шнека $\gamma_{ш}$ (на 40 %), что связано с увеличением времени пребывания резиновой смеси в материальном цилиндре. Чем больше угол наклона нарезки φ (на 33 %), тем меньше суммарный сдвиг в каналах шнека $\gamma_{ш}$ (на 33 %) как для изотермического, так и неизомермического режимов экструзии резиновых смесей.

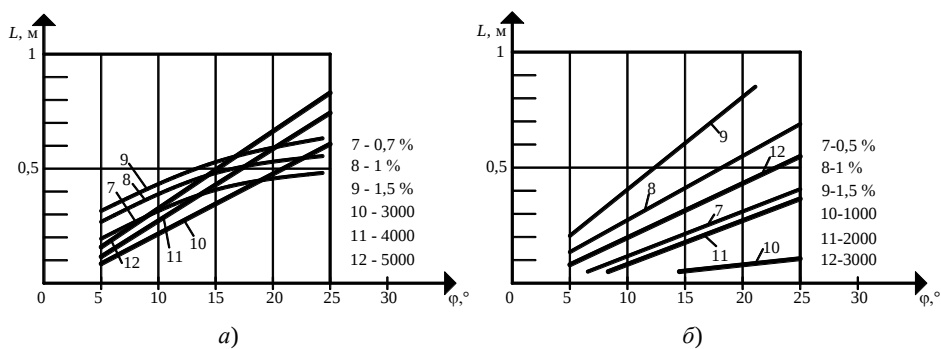


Рис. 8. Линии уровня функций критерия подвулканизации JB (7 – 9) и суммарного сдвига $\gamma_{\text{ш}}$ (10 – 12) для $H = 0,006$ м; $D = 0,032$ м; $\omega = 5,2$ с⁻¹ (50 об/мин); $e = 0,0032$ м; $\delta_{ц} = 0,001$ м:
а – изотермический режим; б – неизотермический режим экструзии

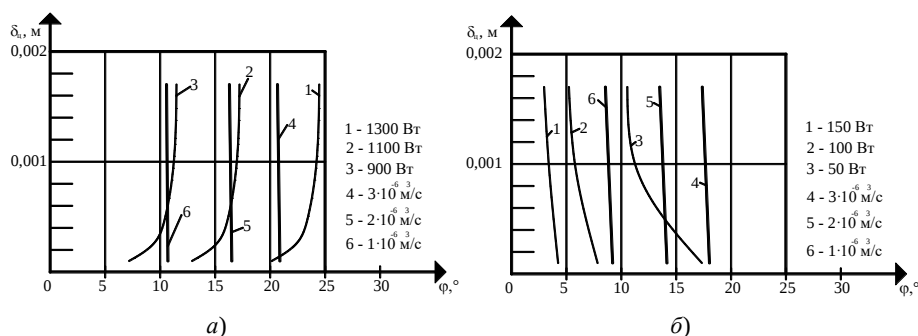


Рис. 9. Линии уровня функций мощности N (1 – 3) и производительности Q (4 – 6) для $H = 0,004$ м; $D = 0,032$ м; $\omega = 3,76$ с⁻¹ (35 мин⁻¹); $L = 0,32$ м; $e = 0,0032$ м:
а – изотермический режим; б – неизотермический режим экструзии

На рисунке 9 показано влияние угла наклона винтовой линии φ и зазора $\delta_{ц}$ между гребнем червяка и внутренней поверхностью материального цилиндра на полезную мощность N и производительность Q . Очевидно, что в области своих реальных значений угол наклона нарезки φ , по сравнению с зазором $\delta_{ц}$, влияет на изменение полезной мощности N незначительно. Причем, чем больше угол наклона нарезки φ (на 33 %) в области своих реальных значений, тем меньше полезная мощность N (на 10 %) при изотермическом процессе, а чем больше угол наклона нарезки φ (на 33 %) в области своих реальных значений при неизотермическом процессе, тем больше полезная мощность N (на 5 %). Полезная мощность N уменьшается на 5 % при увеличении зазора $\delta_{ц}$ на 200 % (кривые 1 – 3), так как уменьшается сопротивление материала в зазоре между гребнем червяка и внутренней поверхностью материального цилиндра $\delta_{ц}$, то есть уменьшается величина сил трения, следовательно, требуется меньше энергии на преодоление этих сил трения.

Производительность Q не зависит от изменения зазора $\delta_{ц}$, и в большей степени зависит от угла наклона нарезки φ , что объясняется малой величиной потока утечки в силу малости величины зазора $\delta_{ц}$ как для изотермического, так и неизотермического режимов экструзии резиновых смесей.

На рисунке 10 показано влияние угла наклона винтовой линии φ и зазора $\delta_{ц}$ между гребнем червяка и внутренней поверхностью материального цилиндра на критерий подвулканизации JB и суммарный сдвиг в каналах шнека $\gamma_{\text{ш}}$.

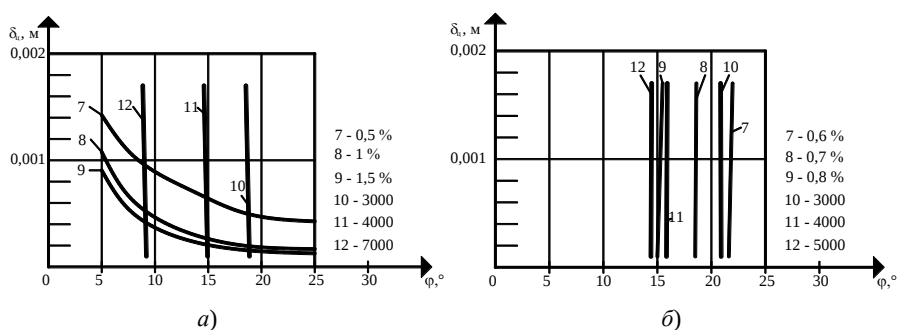


Рис. 10. Линии уровня функций критерия подвулканизации JB (7 – 9) и суммарного сдвига $\gamma_{ш}$ (10 – 12) для $H = 0,004$ м; $D = 0,032$ м; $\omega = 3,76$ с⁻¹ (35 мин⁻¹); $L = 0,32$ м; $e = 0,0032$ м:
a – изотермический режим; *б* – неизотермический режим экструзии

Суммарный сдвиг в каналах шнека $\gamma_{ш}$ в большей степени зависит от угла наклона нарезки ϕ , чем от зазора δ_d при изотермическом режиме экструзии (рис. 10, *a*). Причем, чем больше угол наклона нарезки ϕ (на 33 %), тем меньше суммарный сдвиг в каналах шнека $\gamma_{ш}$ (на 33 %), что связано с уменьшением времени пребывания резиновой смеси в материальном цилиндре за счет большей производительности червячной машины Q .

Суммарный сдвиг в каналах шнека $\gamma_{ш}$ при неизотермическом режиме экструзии в большей степени зависит от угла наклона нарезки ϕ , чем от зазора δ_d (см. рис. 10, *б*). Причем, чем больше угол наклона нарезки ϕ (на 33 %), тем меньше суммарный сдвиг в каналах шнека $\gamma_{ш}$ (на 30 %), что связано с уменьшением времени пребывания резиновой смеси в материальном цилиндре за счет большей производительности червячной машины Q .

Критерий подвулканизации JB в большей степени зависит от зазора δ_d , чем от угла наклона нарезки ϕ при изотермическом режиме экструзии (см. рис. 10, *a*). Причем, чем больше зазор δ_d (на 100 %) в области реальных значений угла наклона нарезки ϕ , тем меньше критерий подвулканизации JB (на 66 %), что связано с уменьшением времени пребывания резиновой смеси в материальном цилиндре за счет большей производительности Q . Критерий подвулканизации JB практически не зависит от зазора δ_d , а в большей степени зависит от угла наклона нарезки ϕ при неизотермическом режиме экструзии (см. рис. 10, *б*), что связано с малой величиной потока утечки в зазоре δ_d .

На рисунке 11 показано влияние угла наклона винтовой линии ϕ и ширины гребня e червяка на полезную мощность N и производительность Q . Полезная мощность N в большей степени зависит от угла наклона нарезки ϕ , чем от ширины гребня червяка e . Причем, чем больше угол наклона нарезки ϕ (на 33 %) в области реальных своих значений, тем больше полезная мощность N (на 8 %) при неизотермическом режиме экструзии (см. рис. 11, *б*, кривые 1 – 3). Чем больше ширина гребня червяка (на 33 %) в области реальных своих значений, тем больше полезная мощность N (на 20 %) при изотермическом режиме экструзии (см. рис. 11, *a*, кривые 1 – 3), что объясняется увеличением сопротивления материала в зазоре между гребнем червяка и внутренней поверхностью материального цилиндра δ_d , то есть увеличивается величина сил трения, следовательно, требуется больше энергии на преодоление этих сил трения.

Производительность Q в большей степени зависит от угла наклона ϕ , чем от ширины гребня червяка e (см. рис. 11), так как изменение ширины гребня

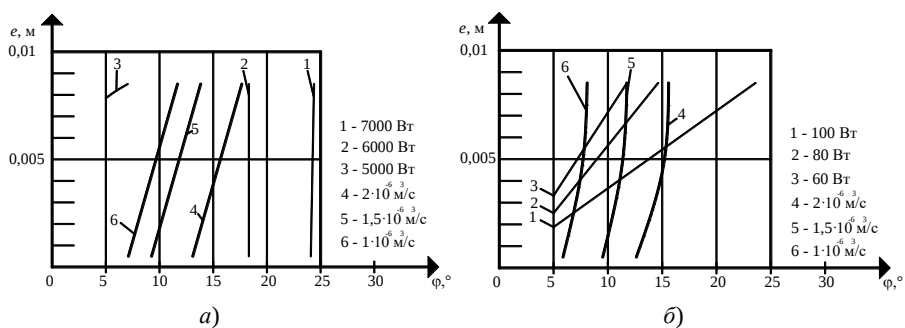


Рис. 11. Линии уровня функций мощности N (1 – 3) и производительности Q (4 – 6) для $H = 0,004$ м; $D = 0,032$ м; $\omega = 3,14$ с⁻¹ (30 об/мин); $L = 0,32$ м; $\delta_n = 0,001$ м:
a – изотермический режим; *б* – неизомермический режим экструзии

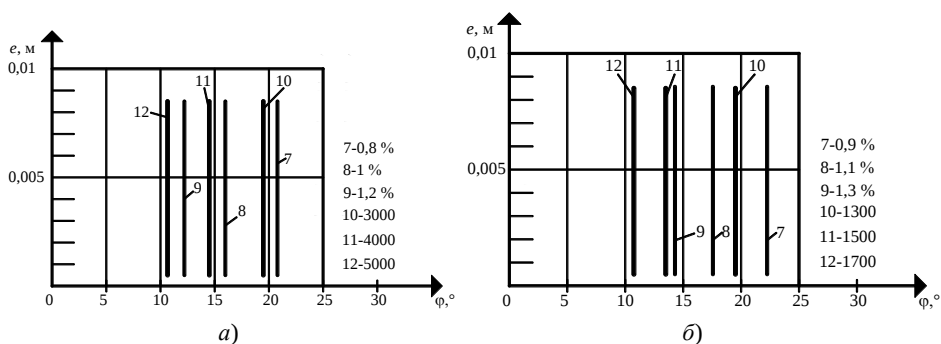


Рис. 12. Линии уровня функций критерия подвулканизации JB (7 – 9) и суммарного сдвига $\gamma_{ш}$ (10 – 12) для $H = 0,004$ м; $D = 0,032$ м; $\omega = 3,14$ с⁻¹ (30 об/мин); $L = 0,32$ м; $\delta_n = 0,001$ м:
a – изотермический режим; *б* – неизомермический режим экструзии

червяка e (на 33 %) приводит к изменению производительности Q (на 5 %) за счет потока утечки, который составляет малую долю от прямотока. Чем больше угол наклона нарезки ϕ (на 33 %), тем больше производительность Q (на 33 %) для изотермического и неизомермического режимов экструзии резиновых смесей.

На рисунке 12 показано влияние угла наклона винтовой линии ϕ и ширины гребня e червяка на критерий подвулканизации JB и суммарный сдвиг $\gamma_{ш}$.

Критерий подвулканизации JB в большей степени зависит от угла наклона нарезки червяка ϕ , чем от ширины гребня червяка e (см. рис. 12, кривые 7 – 9). Причем, чем больше угол наклона нарезки червяка ϕ (на 33 %), тем меньше критерий подвулканизации JB (на 30 %), так как увеличивается производительность и, следовательно, уменьшается время пребывания резиновой смеси в материальном цилиндре для изотермического и неизомермического режимов экструзии резиновых смесей.

Суммарный сдвиг в каналах шнека $\gamma_{ш}$ в большей степени зависит от угла наклона нарезки ϕ , чем от ширины гребня червяка e (см. рис. 12). Причем, чем больше угол наклона нарезки ϕ (на 33 %) в области своих реальных значений, тем меньше суммарный сдвиг в каналах шнека $\gamma_{ш}$ (на 30 %), что связано с малой величиной потока утечки в кольцевых каналах образованных гребнем червяка (длина канала равна ширине гребня червяка e) и размером зазора между гребнем червяка и внутренней поверхностью материального цилиндра $\delta_{ц}$ (высота канала), а также уменьшением времени пребывания резиновой смеси в материальном цилиндре как для изотермического, так и неизомермического режимов экструзии резиновых смесей.

Заключение

Исходя из анализа линий уровня функций состояния, таких как полезная мощность N , производительность шнековой машины Q , критерий подвулканизации JB и суммарный сдвиг $\gamma_{ш}$ (см. рис. 1 – 12), проводился выбор параметров управления для исследования и оптимизации процесса и конструкции оборудования для переработки резиновых смесей при различных режимах экструзии. Рассматривая влияние каждого из основных технологических (ω) и конструктивных (φ , h , D , L , $\delta_{ц}$, e) параметров на величину изменения функций состояния (N , Q , JB , γ), то есть определяя их вес, выбирались в качестве параметров управления следующие варьируемые величины: глубина винтового канала шнека h ; его наружный диаметр D ; угловая скорость ω и длина нарезной части L .

Такие параметры, как угол наклона нарезки червяка φ , зазор между гребнем червяка и внутренней поверхностью материального цилиндра δ , ширина гребня винтового канала e , исключаем, так как они не оказывают или оказывают незначительное влияние на изменения функций состояния (N , Q , JB , $\gamma_{ш}$) по отношению к выбранным параметрам управления, то есть варьируемым параметрам (h , D , ω , L).

Список литературы

1. Влияние подвулканизации на относительное изменение размеров длиномерных резинотехнических заготовок / М. В. Соколов, А. С. Клинков, П. С. Беляев, В. Г. Однолько // *Вопр. совр. науки и практики*. Ун-т им. В. И. Вернадского. Серия: Технические науки. – 2008. – Т. 2, № 2(12). – С. 116 – 120.
2. Применение интегральных критериев качества при переработке полимерных материалов валково-шнековым методом / А. С. Клинков, М. В. Соколов, Д. Л. Полушкин [и др.] // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2008. – Т. 14, № 4. – С. 870 – 881.
3. Методология расчета оборудования для производства длиномерных резинотехнических заготовок заданного качества / М. В. Соколов, А. С. Клинков, П. С. Беляев, В. К. Скуратов, В. Г. Однолько. – М.: Машиностроение, 2009. – 352 с.
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018612264 Российская Федерация. Линии уровня для выбора начальных значений варьируемых параметров процесса и оборудования экструзии профильных заготовок из резиновых смесей (Linyur) / Соколов М. В. (РФ); правообладатель ФГБОУ ВО «ТГТУ». – № 2017663961 : заявл. 28.12.2017 : опубли. 14.02.2018. Бюл. № 2.

The Influence of Mode Variables and Design Equipment Parameters on Energy Consumption and Quality Parameters of Long Rubber Billets

M. V. Sokolov^{1✉}, P. S. Belyaev², D. V. Tulyakov³

Departments: Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering (1), msok68@mail.ru; Materials and Technology (2), TSTU, Tambov, Russia; Tambov Business College (3), Tambov, Russia

Keywords: long profile billets; optimization criteria; sub-vulcanization criterion; level lines; control parameters; useful power; rubber products; total shear in screw channels.

Abstract: In order to choose control parameters for optimization of extrusion process and design of equipment for processing rubber mixtures into long profile billets, nature and weight of relative influence of main technological and design parameters between each other and on state functions, such as useful power, screw machine productivity, sub-vulcanization criterion and total shift in screw channels, i.e. their joint correlation is investigated.

References

1. Sokolov M.V., Klinkov A.S., Belyayev P.S., Odnol'ko V.G. [Effect of pre-vulcanization on the relative change in the dimensions of long rubber blanks], *Voprosy sovremennoj nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2008, vol. 2, no. 2(12), pp. 116-120. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Klinkov A.S., Sokolov M.V., Polushkin D.L., Shashkov I.V., Belyayev P.S., Tulyakov D.V. [Application of integral quality criteria in the processing of polymeric materials by the roller-screw method], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2008, vol. 14, no. 4, pp. 870-881. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Sokolov M.V., Klinkov A.S., Belyayev P.S., Skuratov V.K., Odnol'ko V.G. *Metodologiya rascheta oborudovaniya dlya proizvodstva dlinnomernykh rezinotekhnicheskikh zagotovok zadannogo kachestva* [Methodology for calculating equipment for the production of long rubber blanks of a given quality], Moscow: Mashinostroyeniye, 2009, 352 p. (In Russ.)
4. Sokolov M.V. (RF); *Linii urovnya dlya vybora nachal'nykh znacheniy var'iruyemykh parametrov protsessa i oborudovaniya ekstruzii profil'nykh zagotovok iz rezinovykh smesey (Linyur)* [Level lines for selecting the initial values of variable process parameters and equipment for extrusion of profile blanks from rubber compounds (Linyur)], Russian Federation, 2018, No. 2018612264 (In Russ.)

Einfluss von regimevariablen und konstruktiven Geräteparametern auf den Energieverbrauch und Qualitätsindikatoren der Langgummirohlinge

Zusammenfassung: Zur Auswahl von Steuerungsparametern für die Optimierung des Extrusionsprozesses und der Konstruktion von Anlagen zur Verarbeitung von Kautschukmischungen zu langen Profilblöcken sind Art und Gewicht des relativen Einflusses der wichtigsten technologischen und konstruktiven Parameter untereinander und auf Zustandsfunktionen wie Nutzleistung, Schneckenmaschinenproduktivität, Untervulkanisationskriterium und Gesamtscherung in Schneckenkanälen ermittelt, d.h. ihre gemeinsame Korrelation ist untersucht.

Influence des variables de mode et des paramètres constructifs de l'équipement sur la consommation d'énergie et les indicateurs de qualité ébauches en caoutchouc

Résumé: Afin de sélectionner les paramètres de contrôle lors de l'optimisation du processus d'extrusion et de la conception de l'équipement pour le traitement des mélanges de caoutchouc en billettes de profil longues, est définie la nature et le poids de l'influence des principaux paramètres technologiques et structurels entre eux et sur les fonctions de l'état, telles que la puissance.

Авторы: *Соколов Михаил Владимирович* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; *Беляев Павел Серафимович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Материалы и технология», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия; *Туляков Денис Валерьевич* – преподаватель ТОГАПОУ «Тамбовский бизнес-колледж», Тамбов, Россия.