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

2022. Том 28. № 4.

Четырехъязычный научно-теоретический и прикладной журнал широкого профиля

Four-Language Scientific-Theoretical and Applied Multidisciplinary Journal

Основан в 1995 году

Выходит 4 раза в год

http://vestnik.tstu.ru

Россия Тамбов
Издательство ТГТУ

Совет редакторов

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Подписано в печать 15.12.2022. Дата выхода в свет 27.12.2022.
Формат 70×108/16. Усл. печ. л. 14,70; уч.-изд. л. 16,80. Тираж 100 экз. Цена свободная. Заказ 053.
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», 2022
© Коллектив авторов, 2022

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Издатель: ФГБОУ ВО «ТГТУ»

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

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

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

Подписной индекс в каталоге «Роспечать» – 20498

СОДЕРЖАНИЕ

Автоматика. Информатика. Управление. Приборы 526

Балабанов П. В., Жиркова А. А., Дивин А. Г., Егоров А. С., Мищенко С. В., Шишкина Г. В. Информационно-измерительная система для управления процессом сортировки овощей и фруктов 526

Матвейкин В. Г., Дмитриевский Б. С., Терехова А. А., Аль Кнфер С. Н. А., Аль-Амиди М. А. Д., Аль-Хамами О. Х. Я., Гогорян М. Л., Дмитриев Д. Г. Анализ многосвязного технологического процесса как объекта управления на примере пищевых производств 534

Тихомиров С. Г., Маслов А. А., Карманова О. В., Хаустов И. А., Линцова Е. В., Олейник А. С. Программное обеспечение для исследования процессов вулканизации полимерных композиций с помощью математического моделирования 544

Пономарев С. В., Буланова В. О., Буланов Е. В. Методология получения целевой функции и решения задач оптимизации способов и устройств для измерения теплофизических свойств веществ на примере метода плоского импульсного источника теплоты 559

Обухов А. Д., Патутин К. И., Назарова А. О. Алгоритмы обработки данных в автоматических системах управления на основе компьютерного зрения 573

Сулаберидзе В. Ш., Неклюдова А. А. Гармонизация международных и национальных форм подтверждения соответствия методик измерений 586

Лебедь Н. И., Токарев К. Е., Нехорошев Д. Д., Аксенов М. П. Исследование и моделирование режимов работы программно-аппаратного комплекса системы микроклимата на базе микроконтроллера ATmega2560 596

Каштанов В. В., Немтинов В. А. Анализ организации связи с применением беспилотных летательных аппаратов малой дальности 606

Процессы и аппараты химических и других производств. Химия 615

Стенько Д. В., Капранова А. Б., Бахаева Д. Д., Федорова Д. В., Лебедев А. Е. Анализ смешения твердого дисперсного полимерного сырья для киберфизической поддержки рециклинга 615

Шестаков К. В. Расчет и прогнозирование кинетических параметров массопереноса через ионообменные мембраны на основе фрикционной теории 628

Синютина С. Е., Шубина А. Г., Розенблюм Л. В. Влияние тяжелых металлов и флаваноидов на метаболическую активность *Saccharomyces cerevisiae* 637

Математика. Физика 644

Осиленкер Б. П., Нахман А. Д. Два класса операторов свертки в весовых лебеговых пространствах 644

Машиностроение. Металлообработка 662

Мансур В., Першин В. Ф. Агрегаты для приготовления смеси из компонентов, склонных к сегрегации: современное состояние и перспективы. Часть I. 662

Бондаренко Н. В., Соколов М. В. Разработка алгоритма расчета припуска на механическую обработку деталей для среды программирования Python 674

Наши новые профессора, доктора и кандидаты наук 685

CONTENTS

Automation. Information Technology. Control. Instruments 526

Balabanov P. V., Zhirkova A. A., Divin A. G., Egorov A. S., Mishchenko S. V., Shishkina G. V. An Information-Measuring System to Monitor Vegetable and Fruit Sorting Process 526

Matveikin V. G., Dmitrievsky B. S., Terekhova A. A., Al Knfer S. N. A., Al Amidi M. A. D., Al-Hamami O. H. Y., Gogoryan M. L., Dmitriev D. G. The Analysis of a Multiple-Connected Technological Process as a Control Object Using the Example of Food Industries 534

Tikhomirov S. G., Maslov A. A., Karmanova O. V., Khaustov I. A., Lintsova E. V., Oleinik A. S. Software for Investigation of Polymer Composition Vulcanization Processes Using Mathematical Modeling 544

Ponomarev S. V., Bulanova V. O., Bulanov E. V. Methodology for Obtaining the Objective Function and Solving the Problems of Optimization of Methods and Devices for Measuring Thermophysical Properties of Substances Using the Example of the Method of a Plane Pulsed Heat Source 559

Obukhov A. D., Patutin K. I., Nazarova A. O. Data Processing Algorithms in Automatic Control Systems Based on Computer Vision 573

Sulaberidze V. Sh., Neklyudova A. A. Harmonization of International and National Forms of Confirmation of Conformity of Measurement Techniques 586

Lebed N. I., Tokarev K. E., Nekhoroshev D. D., Aksenov M. P. Research and Simulation of Operation Modes of Hardware-Software Complex of Microclimate System Based on Programmable Microcontroller ATmega2560 596

Kashtanov V. V., Nemtinov V. A. The Analysis of the Organization of Communication Using Small-Range Unmanned Aerial Vehicles 606

Chemical Engineering and Related Industries. Chemistry 615

Stenko D. V., Kapranova A. B., Bakhaeva D. D., Fedorova D. V., Lebedev A. E. Analysis of Mixing the Solid Dispersed Polymer Raw Materials for Cyber-Physical Support of Recycling 615

Shestakov K. V. Calculation and Prediction of Kinetic Parameters of Mass Transfer through Ion-Exchange Membranes on the Basis of Friction Theory 628

Sinyutina S. E., Shubina A. G., Rosenblum L. V. The Effect of Heavy Metals and Flavanoids on the Metabolic Activity of *Saccharomyces Cerevisiae* 637

Mathematics. Physics 644

Osilenker B. P., Nakhman A. D. Two Classes of Convolution Operators in Weighted Lebesgue Spaces 644

Mechanical Engineering. Metal Treatment 662

Mansur V., Pershin V. F. Apparatus for Preparing a Mixture from Components Prone to Segregation: Current Status and Prospects. Part I 662

Bondarenko N. V., Sokolov M. V. Development of an Algorithm for Calculation of the Allowance for Mechanical Processing of Parts for the Python Programming Environment 674

New Professors, Doctors and Candidates of Sciences 685

УДК 004.896
DOI: 10.17277/vestnik.2022.04.pp.526-533

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СОРТИРОВКИ ОВОЩЕЙ И ФРУКТОВ

**П. В. Балабанов, А. А. Жиркова, А. Г. Дивин,
А. С. Егоров, С. В. Мищенко, Г. В. Шишкина**

*Кафедра «Мехатроника и технологические измерения», miti@tstu.ru;
ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: информационно-измерительная система; искусственные нейронные сети; система технического зрения; сортировка яблок.

Аннотация: Представлена функциональная схема информационно-измерительной системы для управления процессом сортировки яблок на основе обработки изображений яблок с использованием полносвязной искусственной нейронной сети прямого распространения. Основными элементами системы технического зрения является камера Basler acA1920-155uc, гиперспектральная камера Spexim FX10, система сканирования яблок на основе вращающего зеркала. Представлены сведения о методе и результатах выбора оптимальных параметров нейронной сети, обеспечивающих точность классификации дефектов яблок, равную 86 %. При этом входными параметрами являлись вегетационные индексы NDVI, ARI1, CRI2, PSRI, а также индекс влагосодержания WBI.

Введение

Хранение овощей и фруктов после сбора урожая является одним из важнейших этапов их жизненного цикла. Следует учитывать, что в процессе хранения в растительных тканях фруктов и овощей происходят необратимые изменения вследствие физико-химических процессов, что приводит к потере качества и порче продукции. Поэтому продление срока годности и сокращение послеуборочных потерь скоропортящихся фруктов и овощей является актуальной задачей, решаемой путем совершенствования технологических процессов после сбора урожая. Такими процессами являются сушка, хранение растительных продуктов в контролируемой атмосфере при соответствующей температуре и влажности [1]. При этом важно в процессе сортировки удалить из общей массы продукции плоды и овощи, зараженные инфекционными фитозаболеваниями (вручную или автоматически) [2, 3].

Ручной контроль при сортировке отнимает много времени и сил. Для автоматизации сортировки пищевых и сельскохозяйственных продуктов широко используются системы технического зрения [4], которые за десятилетия интенсив-

ной работы зарекомендовали себя как эффективный инструмент. Результаты применения информационных технологий в области контроля внешнего и внутреннего качества фруктов в настоящее время опубликованы на основе целого ряда исследований, проведенных по обработке и анализу изображений и/или спектральных изображений яблок [5], манго [6], цитрусовых [4, 7], основанных на методах машинного обучения и искусственных нейронных сетях. Однако в данной области еще немало проблем, связанных с повышением точности классификации дефектов и снижения ошибок первого и второго рода при отбраковке.

Измерительная установка и алгоритм функционирования

Авторами данной статьи предложена информационно-измерительная система, предусматривающая получение данных о качестве сортируемых яблок в режиме реального времени при их движении по рольганговому конвейеру *1* (рис. 1). Конвейер приводится в движение мотор-редуктором *2*, управляемым контролером *3* типа Segnetics SMH4, через частотный преобразователь *4*. Изображения яблок *5*, освещенные галогенными лампами и подсвеченные инфракрасным источником Microlight IR Plate-3-950 мощностью 10 W, получают от видеокамеры *6* типа Basler acA-1920-155uc и гиперспектральной камеры 7Specim FX10, подключенных к компьютеру *8* [9]. Так как гиперспектральная камера имеет линейный детектор, то для получения двумерных изображений объектов на конвейере используют сканирующую систему на основе зеркала *11*, способного вращаться благодаря шаговому двигателю *10*.

Скорость вращения двигателя синхронизирована со скоростью движения конвейера, которая рассчитывается благодаря индуктивному датчику *12* по времени между импульсами его выходного сигнала, возникающими за счет движения втулок металлической приводной цепи. Отбраковка яблок в емкости *14* и *15*, предназначенные соответственно для годных и дефектных плодов, осуществляется при помощи устройства сортировки *13* по сигналу с контроллера *9*.

Алгоритм функционирования информационно-измерительной системы показан на рис. 2 и основан на использовании методов искусственного интеллекта.

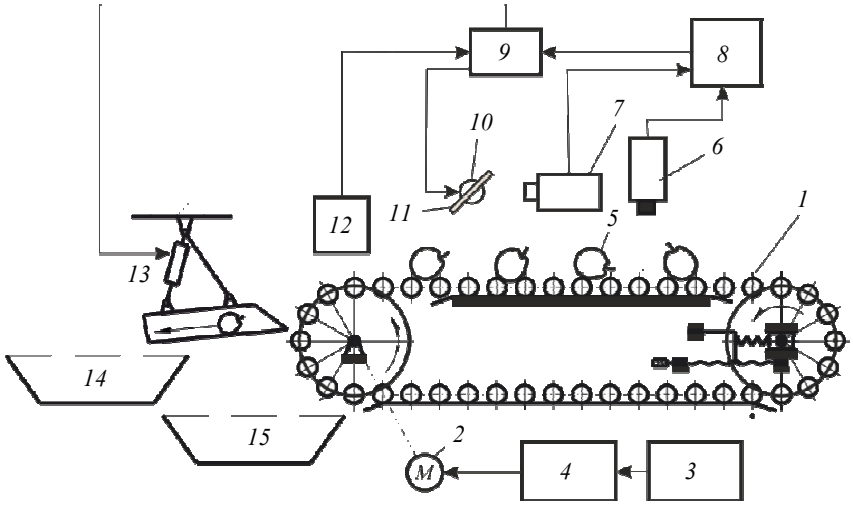


Рис. 1. Информационно-измерительная система контроля качества яблок и их сортировки

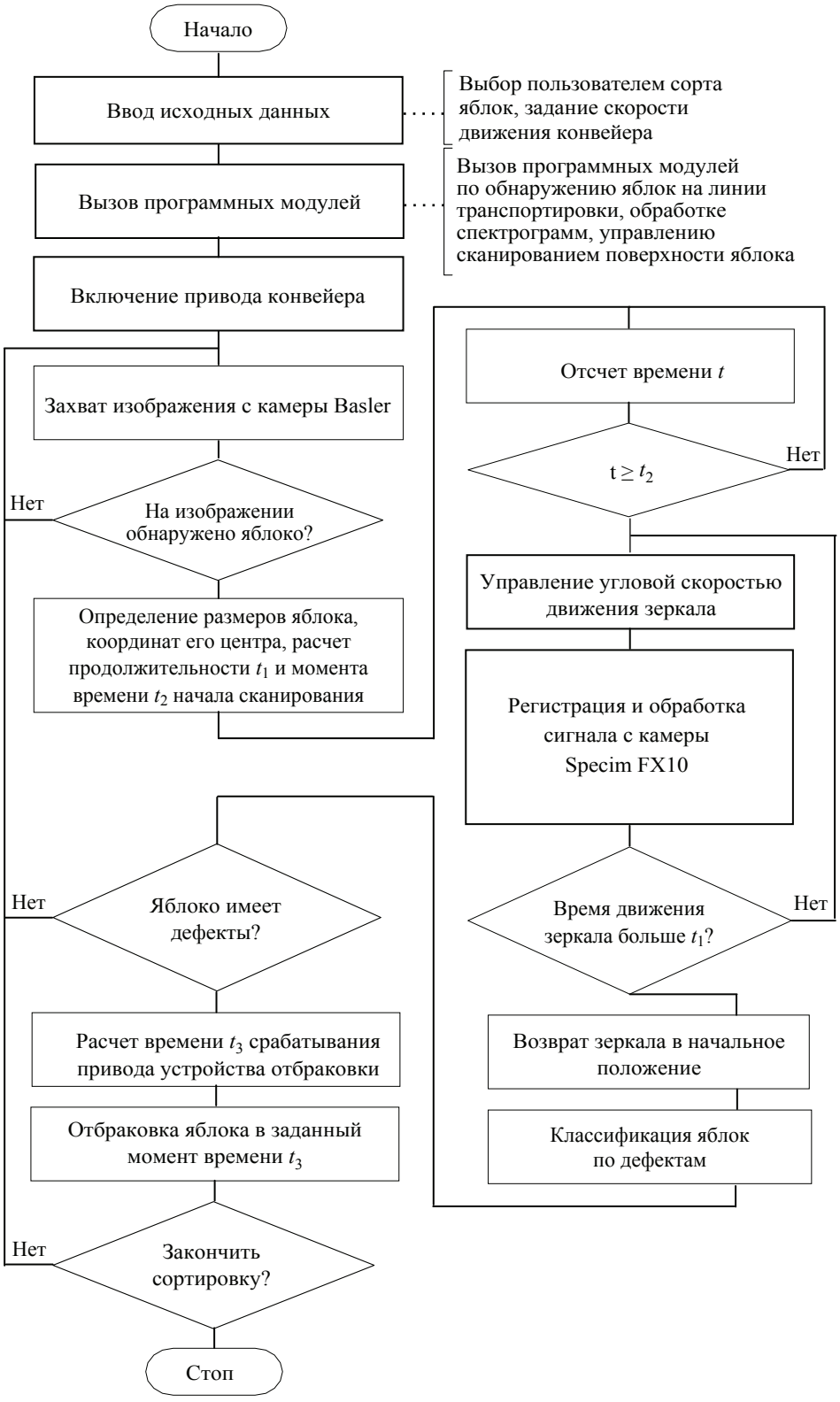


Рис. 2. Блок-схема алгоритма функционирования информационно-измерительной системы

При этом использовалась искусственная нейронная сеть прямого распространения, на входы которой подавалась информация от гиперспектральной камеры. Для этого с помощью камеры Specim FX10 получены спектрограммы поверхностей конвейера (роликов черного матового цвета) и трех сортов яблок «Имрус», «Спартан», «Орловское», содержащих неповрежденную растительную ткань, загнившую растительную ткань, поврежденную паршой, джонатановой пятнистостью и сельхозвредителями. Как показал проведенный анализ полученных спектрограмм, вегетационные индексы NDVI, ARI1, CRI2, PSRI [8], рассчитанные по спектрограммам отраженного света от поверхности объекта контроля, несут информацию, достаточную для классификации яблок по видам дефектов. Дополнительно проведено исследование влияния влагосодержания яблока на его спектрограмму, которое показало, что поглощение излучения влагой, содержащейся в яблоке, наблюдается на длине волны 962 нм и увеличивается с повышением влагосодержания, а на длине волны 905 нм поглощение не зависит от влагосодержания растительной ткани. В связи с этим предложено использовать индекс содержания влаги, вычисляемый по выражению RI_{905}/ RI_{962}.

По результатам выполненного анализа предложен подход к обработке спектрограмм яблок, состоящий в том, что полученные гиперспектральной камерой Specim FX10 спектрограммы (участки спектрограмм объекта контроля, соответствующие длинам волн, используемых при расчете вегетационных индексов, будут сравниваться с «эталонными» (участками спектрограмм, заранее полученных с поверхностей объектов *i*-го класса по табл. 1). Для реализации этого подхода использовалась полносвязная искусственная нейронная сеть, обученная по более чем 50 000 спектрограммам, соответствующим различному качеству растительной ткани яблок. Поскольку сенсор камеры Specim FX10, применяемой для получения спектрограмм, включает 1024 чувствительных элемента, расположенных в линию, было получено 1024 спектрограммы для точек, лежащих в области измерения вдоль роликов конвейера. При этом шаг по длине конвейера составил менее 0,3 мм, что позволяет выявлять даже самые мелкие дефекты на поверхности яблока.

Указанные выше вегетационные индексы являются входами I_i, $i = 1…5$, нейронной сети с двумя скрытыми слоями и используются для расчета входных (input) и выходных (output) значений нейронов каждого скрытого слоя по весам и смещениям, которые были вычислены в процессе обучения нейросети.

Таблица 1

Классы поверхностей контроля

Вид объекта контроля, с которого получена спектрограмма	Класс объекта
Не поврежденная растительная ткань	0
Увядший плод	1
Плоды:	
с загнившими растительными тканями	2
с джонатановой пятнистостью	3
поврежденные сельхозвредителями	4
с пятнами парши	5
Не поврежденная растительная ткань, содержащая:	
плодоножку	6
чашелистики	7
Поверхность конвейера	8

Выходом нейросети является класс поверхности объекта контроля в соответствие с табл. 1.

Разработанный алгоритм обработки спектрограммы включает: вычисление индексов NDVI, ARI1, CRI2, PSRI, а также WBI = RI_{905}/RI_{962}, обработку их при помощи полносвязной нейронной сети прямого распространения с двумя скрытыми слоями (см. табл. 1).

Параметры нейросети выбирались исходя из достижения наибольшего значение параметра *Ac*, вычисляемого по формуле

$$Ac = 1 - P,$$

где $P = N_1/N + N_2/n$; N_1, N_2, n – число ошибок соответственно первого, второго рода и общее число испытаний; под ошибками первого рода понимается случай, когда спектрограммы классов 0, 6, 7 (по табл. 1) нейросеть относит к классам 1 – 5, 8, то есть яблоко без дефектов будет считаться дефектным.

Под ошибкой второго рода понимаем случай, когда спектрограммы классов 1 – 5, 8 нейросеть относит к классам 0, 6, 7, то есть яблоко с дефектом будет определено как бездефектное.

Варьируемые параметры нейросети:

– количество скрытых слоев (1 – 4);

– функции активации для каждого слоя (relu, sigmoid, softmax);

– количество эпох обучения (10…30);

– размер партии обучения (250…1000);

– количество нейронов в каждом скрытом слое (16….128).

Алгоритм поиска оптимальных параметров нейросети заключался в том, что на вход нейросети передавалось $N = 1000$ спектрограмм и для заданной комбинации параметров нейросети вычислялось значение параметра *Ac*. Оптимальными считались параметры из множества, для которого параметр *Ac* принимает наибольшее значение. В результате перебора множества комбинаций и расчета параметра *Ac* получены следующие оптимальные значения: количество эпох – 30, скрытых слоев – 2, число нейронов в первом слое – 128, во втором – 64. Диапазоны варьируемых параметров выбраны, исходя из рекомендованных в работах [10 – 12].

При этом значение параметра оказалось равным 0,84, количество ошибок первого и второго рода при классификации поверхности равнялось при этом 16 %, что сопоставимо с результатами исследований зарубежных авторов [11, 12]. Повышение точности классификации возможно при увеличении объема обучающей выборки.

Результаты исследований получены при поддержке РФФИ, грант № 20-38-90235.

Список литературы

1. Primary Metabolism in Fresh Fruits During Storage / S. Brizzolara, G. A. Manganaris, V. Fotopoulos [et al.] // Frontiers in Plant Science. – 2020. – Vol. 11. – Art. 80. doi: 10.3389/fpls.2020.00080

2. Application of Infrared Vision System for Potato Thermal Control / A. Churikov, A. Divin, A. Egorov, L. Podestà // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1084, No. 1. – P. 012002. doi: 10.1088/1742-6596/1084/1/012002

3. Mohammadi Baneh, N. Mechatronic Components in Apple Sorting Machines with Computer Vision / N. Mohammadi Baneh, H. Navid, J. Kafashan // Journal of Food Measurement and Characterization. – 2018. – Vol. 12, No. 2. – P. 1135 – 1155. doi: 10.1007/s11694-018-9728-1

4. Blasco, J. Machine Vision System for Automatic Quality Grading of Fruit / J. Blasco, N. Aleixos, E. Moltó // Biosystems Engineering. – 2003. – Vol. 85, No. 4. – P. 415 – 423. doi: 10.1016/S1537-5110(03)00088-6

5. Qin, J. Measurement of the Optical Properties of Fruits and Vegetables Using Spatially Resolved Hyperspectral Diffuse Reflectance Imaging Technique / J. Qin, R. Lu // Postharvest Biology and Technology. – 2008. – Vol. 49, No. 3. – P. 355 – 365. doi: 10.1016/j.postharvbio.2008.03.010

6. Long, N. T. M. Using Machine Learning to Grade the Mango's Quality Based on External Features Captured by Vision System / N. T. M. Long, N. T. Thinh // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10, No. 17. – P. 5775. doi: 10.3390/APP10175775

7. Khairullah, K. Identifikasi Kematangan Cabai Menggunakan Operasi Morfologi (Opening dan Closing) dan Metode Backpropagation / K. Khairullah, E. D. Putra // SISTEMASI. – 2021. – Vol. 10, No. 1. – P. 96 – 105. doi: 10.32520/stmsi.v10i1.1094

8. Vision System for Detection of Defects on Apples Using Hyperspectral Imaging Coupled with Neural Network and Haar Cascade Algorithm / P. V. Balabanov, A. G. Divin, A. S. Egorov [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 862, No. 5. – P. 052058. doi: 10.1088/1757-899X/862/5/052058

9. Жиркова, А. А. Выбор источников освещения при оптико-электронном контроле качества фруктов / А. А. Жиркова, П. В. Балабанов, А. Г. Дивин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2021. – Т. 27, № 4. – С. 536 – 542. doi: 10.17277/vestnik.2021.04.pp.536-542

10. Marpu, P. R. Hyperspectral Data Classification Using an Ensemble of Class-Dependent Neural Networks / P. R. Marpu, P. Gamba, I. Niemeyer // First Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing, 26 – 28 August, 2009, Grenoble, France. – IEEE, 2009. doi: 10.1109/whispers.2009.5289013

11. Design of an Automatic Apple Sorting System Using Machine Vision / M. M. Sofu, O. Er, M. C. Kayacan, B. Cetişli // Computers and Electronics in Agriculture. – 2016. – Vol. 127. – P. 395 – 405. doi: 10.1016/j.compag.2016.06.030

12. Wu, A. Detection of Apple Defect Using Laser-Induced Light Backscattering Imaging and Convolutional Neural Network / A. Wu, J. Zhu, T. Ren // Computers & Electrical Engineering. – 2020. – Vol. 81. – P. 106454. doi: 10.1016/j.compeleceng.2019.106454

An Information-Measuring System to Monitor Vegetable and Fruit Sorting Process

P. V. Balabanov, A. A. Zhirkova, A. G. Divin, A. S. Egorov, S. V. Mishchenko, G. V. Shishkina

Department of Mechatronics and Technological Measurements, miti@tstu.ru; TSTU, Tambov, Russia

Keywords: information-measuring system; artificial neural networks; vision system; sorting apples.

Abstract: The paper presents a functional diagram of an information-measuring system to monitor the process of sorting apples through the processing of images of apples using a fully connected artificial neural network of direct propagation. The main components of the technical perspective system are the Basler acA1920-155uc camera, the Spexim FX10 hyperspectral camera, the apple spinning mirror system. Presenting information about the method and choosing the optimal parameters of the neural network makes it possible to identify cases of infection with apples equal to 86 %. In this case, the input parameters were the vegetative indices NDVI, ARI1, CRI2, PSRI, as well as the moisture content index WBI.

References

1. Brizzolara S., Manganaris G.A., Fotopoulos V., Watkins C.B., Tonutti P. Primary Metabolism in Fresh Fruits During Storage, *Frontiers in Plant Science*, 2020, vol. 11, art. 80, doi: 10.3389/fpls.2020.00080

2. Churikov A., Divin A., Egorov A., Podestà L. Application of Infrared Vision System for Potato Thermal Control, *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1084, no. 1, p. 012002, doi: 10.1088/1742-6596/1084/1/012002

3. Mohammadi Baneh N., Navid H., Kafashan J. Mechatronic Components in Apple Sorting Machines with Computer Vision, *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2018, vol. 12, no. 2, pp. 1135-1155, doi: 10.1007/s11694-018-9728-1

4. Blasco J., Aleixos N., Moltó E. Machine Vision System for Automatic Quality Grading of Fruit, *Biosystems Engineering*, 2003, vol. 85, no. 4, pp. 415-423, doi: 10.1016/S1537-5110(03)00088-6

5. Qin J., Lu R. Measurement of the Optical Properties of Fruits and Vegetables Using Spatially Resolved Hyperspectral Diffuse Reflectance Imaging Technique, *Postharvest Biology and Technology*, 2008, vol. 49, no. 3, pp. 355-365, doi: 10.1016/j.postharvbio.2008.03.010

6. Long N.T.M., Thinh N.T. Using Machine Learning to Grade the Mango's Quality Based on External Features Captured by Vision System, *Applied Sciences*, 2020, vol. 10, no. 17, p. 5775, doi: 10.3390/APP10175775

7. Khairullah K., Putra E.D. Identifikasi Kematangan Cabai Menggunakan Operasi Morfologi (Opening dan Closing) dan Metode Backpropagation, *SISTEMASI*, 2021, vol. 10, no. 1, pp. 96-105, doi: 10.32520/stmsi.v10i1.1094

8. Balabanov P.V., Divin A.G., Egorov A.S., Yudaev V.A., Lyubimova D.A. Vision System for Detection of Defects on Apples Using Hyperspectral Imaging Coupled with Neural Network and Haar Cascade Algorithm, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 862, no. 5, p. 052058, doi: 10.1088/1757-899X/862/5/052058

9. Zhirkova A.A., Balabanov P.V., Divin A.G. [Choice of lighting sources in optoelectronic fruit quality control], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2021, vol. 27, no. 4, pp. 536-542, doi: 10.17277/vestnik.2021.04.pp.536-542 (In Russ., abstract in Eng.)

10. Marpu P.R., Gamba P., Niemeyer I. Hyperspectral Data Classification Using an Ensemble of Class-Dependent Neural Networks, First Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing, 26 - 28 August, 2009, Grenoble, France, IEEE, 2009, doi: 10.1109/whispers.2009.5289013

11. Sofu M.M., Er O., Kayacan M.C., Cetişli B. Design of an Automatic Apple Sorting System Using Machine Vision, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016, vol. 127, pp. 395-405, doi: 10.1016/j.compag.2016.06.030

12. Wu A., Zhu J., Ren T. Detection of Apple Defect Using Laser-Induced Light Backscattering Imaging and Convolutional Neural Network, *Computers & Electrical Engineering*, 2020, vol. 81, p. 106454, doi: 10.1016/j.compeleceng.2019.106454

Informations- und Messsystem für die Steuerung des Sortierablaufs von Gemüse und Obst

Zusammenfassung: Es ist ein Funktionsdiagramm des Informationsmesssystems zur Steuerung des Prozesses des Sortierens von Äpfeln anhand der Bildverarbeitung von Äpfeln unter Verwendung eines voll vernetzten, künstlichen neuronalen Direktverbreitungsnetzwerks vorgestellt. Die Hauptelemente

des Bildverarbeitungssystems sind die Basler acA1920-155uc-Kamera, die Hyperspektralkamera Spexim FX10 und das Apfel-Scansystem mit rotierendem Spiegel. Es sind Informationen über die Methode und die Ergebnisse der Auswahl der optimalen Parameter des neuronalen Netzes präsentiert, die eine Genauigkeit der Klassifizierung von Äpfelfehlern von 86 % gewährleisten. Eingangsparameter sind in diesem Fall die Vegetationsindizes NDVI, ARI1, CRI2, PSRI sowie der Feuchteindex WBI.

Système d'information et de mesure pour la gestion du processus de tri des légumes et des fruits

Résumé: Est présenté un schéma fonctionnel du système d'information et de mesure pour la gestion du processus de tri des pommes à la base du traitement des images des pommes à l'aide d'un réseau neuronal artificiel à distribution directe entièrement connecté. Les principaux éléments du système de vision sont la caméra Basler acA1920-155uc, la caméra hyperspectrale Spexim FX10, le système de balayage des pommes basé sur un miroir rotatif. Sont données les informations sur la méthode et les résultats de la sélection des paramètres optimaux du réseau neuronal qui permettent de classer les défauts avec une précision de 86 %. Dans ce cas, les paramètres d'entrée sont les indices de végétation NDVI, ARI1, CRI2, PSRI, ainsi que l'indice de teneur en humidité WBI.

Авторы: ***Балабанов Павел Владимирович*** – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Мехатроника и технологические измерения»; ***Жиркова Александра Александровна*** – аспирант кафедры «Мехатроника и технологические измерения»; ***Дивин Александр Георгиевич*** – доктор технических наук, профессор кафедры «Мехатроника и технологические измерения»; ***Егоров Андрей Сергеевич*** **–** кандидат технических наук, доцент кафедры «Мехатроника и технологические измерения»**;** ***Мищенко Сергей Владимирович*** **–** доктор технических наук, профессор, советник при ректорате; ***Шишкина Галина Викторовна*** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Мехатроника и технологические измерения», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

УДК 62.50
DOI: 10.17277/vestnik.2022.04.pp.534-543

АНАЛИЗ МНОГОСВЯЗНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

В. Г. Матвейкин, Б. С. Дмитриевский, А. А. Терехова, С. Н. А. Аль Кнфер, М. А. Д. Аль-Амиди, О. Х. Я. Аль-Хамами, М. Л. Гогорян, Д. Г. Дмитриев

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

Ключевые слова: диффузионная установка; задача управления; объект управления; производство сахара; технологический процесс; управляющее воздействие; цель управления.

Аннотация: Рассмотрено усовершенствование управления взаимосвязанными технологическими процессами в пищевых производствах, на примере экстракции сахара в диффузионных установках. Приведены методологические основы процесса разработки системы управления. Выявлены особенности объекта управления, недостатки существующих систем управления, изучены взаимосвязи входных и выходных величин, определены управляющие воздействия, учтены условия, которые должны соблюдаться при решении задачи управления.

Введение

Технологические процессы пищевых производств включают переработку сырья в продукты питания. Как и химические процессы, они основаны на фундаментальных положениях закона сохранения массы и закона сохранения энергии, однако обладают своей спецификой из-за сложного комплекса происходящих физико-химических, биохимических и микробиологических процессов.

В пищевых производствах часто применяются процессы массообмена, такие как экстракция, ректификация, абсорбция, адсорбция, растворение и кристаллизация, сушка. Многие технологические процессы идут с образованием неоднородных смесей, которые необходимо разделять. Различные фазы вступают во взаимодействие друг с другом, при этом происходит обмен растворенных в них веществ.

В пищевой промышленности экстрагированию подвергают в основном такое сырье, как сахарную свеклу, различные масличные, фрукты. Например, когда сахарную свеклу, изрезанную на мелкие кусочки, так называемую свекловичную стружку, промывают водой, то сахар, который находится в клетках свеклы, переходит в воду. Данный процесс происходит из-за разности концентрации сахара в свекле и воде. Скорость перехода сахара уменьшается с увеличением его концентрации в воде и снижении в стружке. Процесс останавливается при выравнивании концентраций, так как движущей силой массообменных процессов является разность концентраций.

Анализ технологического процесса

Одна из самых ответственных стадий сахарного производства – получение диффузионного сока в диффузионных установках [1], где при контакте воды со свекловичной стружкой образуется диффузионный сок, содержащий сахар и некоторые несахаристые вещества [2].

На сахарных заводах применяются разнообразные диффузионные установки, среди которых наибольшее распространение получили наклонные установки непрерывного действия (рис. 1).

Свекловичная стружка, полученная на свеклорезках *2* из чистой свеклы, ленточным транспортером *4*, на котором установлены автоматические конвейерные весы *3*, подается в наклонный шнековый диффузионный аппарат *5*. Для извлечения из стружки сахара в диффузионный аппарат добавляется возвратная жомопрессовая вода из сборника *1* и свежая вода из сборника *14*. Жомопрессовая вода получается при прессовании жома (обессахаренной стружки), выходящего из диффузионного аппарата и грабельным транспортером *13* направляемого на весы. Вода из прессов освобождается от мезги, стерилизуется и насосами нагнетается в сборник *1*. Свежую воду (конденсат выпарных аппаратов) подают в сборник *14*. Полученный в диффузионном аппарате сок насосами *9* перекачивается в мезголовушку *6*, где очищается от содержания в нем мезги. Очищенный диффузионный сок собирается в сборник *7*, из которого наносами *8* его подают на очистку. Камеры диффузионного аппарата обогреваются паром. Конденсат пара из камер через водоотводчики *12* поступает в сборник *11*, из которого насосами *10* перекачивается в общезаводской сборник конденсата.

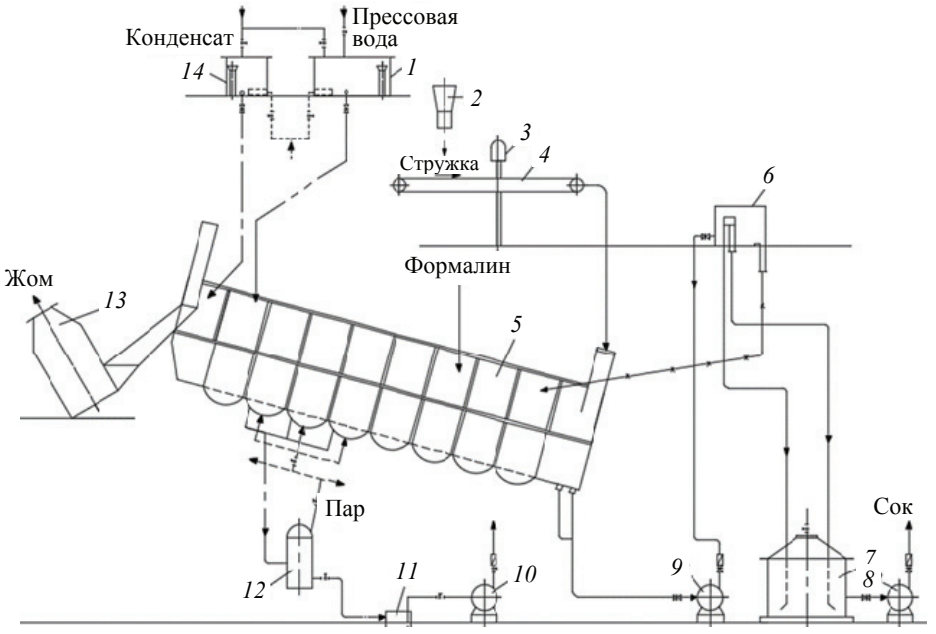


Рис. 1. Технологическая схема свеклоперерабатывающего отделения с наклонным шневковым диффузионным аппаратом

Объектом управления на стадии получения диффузионного сока является наклонный шнековый диффузионный аппарат, где сахар, растворенный в свекловичном соке корнеплода, извлекается из клеток противоточной диффузией, при которой стружка поступает в головную часть агрегата и движется к хвостовой части, отдавая сахар путем диффузии в движущуюся навстречу экстрагенту высоложиванную воду. Из конца хвостовой части агрегата выводится стружка с малой концентрацией сахара (жом), а экстрагент, обогащенный сахаром, выводится как диффузионный сок.

Для выбора режимов работы системы автоматизированного управления процессами, протекающими при получении диффузионного сока, необходимо провести анализ входных и выходных потоков технологического процесса и получить математическое описание объекта управления [3].

Анализ литературных источников [1 – 11] и опыта промышленной эксплуатации позволил выявить следующие особенности объекта:

1. Неустойчивое качество сырья, влияющее на концентрацию сахарозы в диффузионном соке (зависимость от условий выращивания свеклы, хранения и т.д.). Величина коэффициента диффузии сахарозы в большой степени зависит от состояния тканей сахарной свеклы. Например, в недоспелой свекле коэффициент сахарозы на 15 – 20 % ниже, чем в спелой свежеубранной, а в замороженной и оттаявшей – наоборот, на 15 – 20 % выше.

2. На коэффициент диффузии сахарозы в тканях свеклы влияют температура, площадь свекловичной стружки, длительность процесса экстракции.

3. Активная экстракция сахарозы начинается с момента полной денатурации белков в свекловичной стружке и заканчивается с выходом обессахаренной стружки из экстрактора. Большая длительность экстракции приводит к тому, что от воздействия температуры клеточные стенки свеклы размягчаются и пектиновые вещества переходят в сок; в хвостовой части диффузионного аппарата концентрация сахарозы в стружке снижается и резко возрастают неучтенные потери сахарозы в результате интенсивного развития микроорганизмов, которые в процессе обмена веществ потребляют сахар. Продолжительность пребывания свекловичной стружки в диффузионном аппарате зависит от производительности аппарата.

4. С увеличением расхода свежей питающей воды снижаются потери сахарозы в жоме, но увеличивается расход топлива на выпаривание избыточной воды из диффузионного сока.

5. Большая инерционность по каналу управления концентрацией сахарозы в диффузионном соке, который содержит сахарозу и несахара: растворимые белки, пектиновые вещества и продукты их распада, редуцирующие сахара, аминокислоты, слабые азотистые основания, соли органических и неорганических кислот, а также другие химические вещества и примеси.

6. Колебания расхода жомопрессовой и свежей воды, температуры поступающей свеклы.

7. Нестационарность процесса, обуславливаемая изменением теплофизических свойств смеси свекловичной стружки, мезги и питательной воды, находящейся внутри аппарата, и наличием застойных зон.

Входными величинами процесса получения диффузионного сока являются степень открытия клапана на линии подачи пара μ (управляющая величина), а также расходы жомопрессовой $G_{ж.в}$ и свежей $G_{в}$ воды, температуры жомопрес-

совой $T_{ж.в}^{вх}$ и свежей $T_{в}^{вх}$ воды на входе в аппарат, давление в линии подачи пара $P_п$, производительность аппарата по свекле (частота вращения шнека) $n_ш$, температура поступающей свеклы $T_{св}^{вх}$, температура окружающей среды $T_{ОС}$, качество сырья $K_с$, площадь свекловичной стружки $F_с$. Перечисленные величины относятся к возмущающим воздействиям.

Выходные величины следующие: концентрация сахарозы в диффузионном соке $C_с$, расход пара в диффузионный аппарат $G_п$, общий расход смеси из аппарата $G_{общ}$, состоящий из расхода диффузионного сока $G_с$ и жома $G_ж$, температура смеси в диффузионном аппарате $T_д$. На рисунке 2 представлены входные и выходные параметры технологического процесса экстракции в наклонном шнековом диффузионном аппарате как объекте управления. В качестве промежуточной выходной величины, имеющей малую инерционность, будем рассматривать коэффициент диффузии сахарозы D, значение которого в основном определяется температурой смеси в диффузионном аппарате $T_д$ и площадью свекловичной стружки $F_с$.

На рисунке 3 показаны взаимосвязи параметров объекта управления. Зависимости выходных и промежуточного параметров от управляющих и возмущающих воздействий следующие:

$$C_с = f\left(G_{ж.в}, G_в, T_{ж.в}^{вх}, T_в^{вх}, T_{св}^{вх}, T_{ОС}, K_с, F_с, D, \mu, n_ш\right);$$

$$G_п = f\left(G_{ж.в}, G_в, T_{ж.в}^{вх}, T_в^{вх}, P_п, T_{св}^{вх}, T_{ОС}, K_с, \mu, n_ш\right);$$

$$G_{общ} = f\left(G_{ж.в}, G_в, T_{ж.в}^{вх}, T_в^{вх}, T_{св}^{вх}, T_{ОС}, \mu, n_ш\right);$$

$$D = f\left(T_{ж.в}^{вх}, T_в^{вх}, T_{св}^{вх}, T_{ОС}, K_с, F_с, \mu, n_ш\right).$$

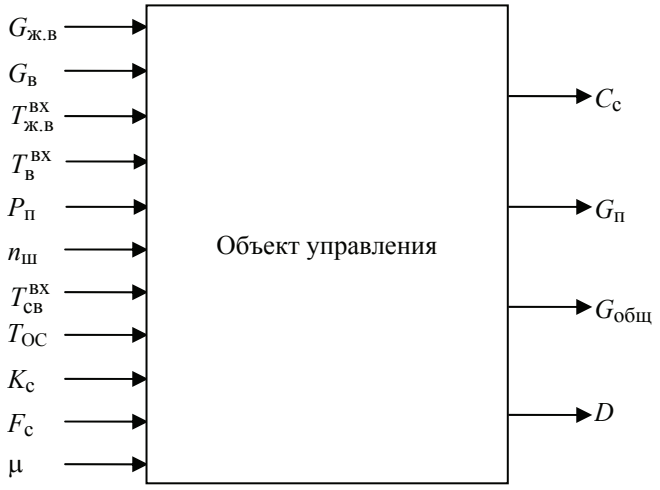


Рис. 2. Входные и выходные параметры объекта управления

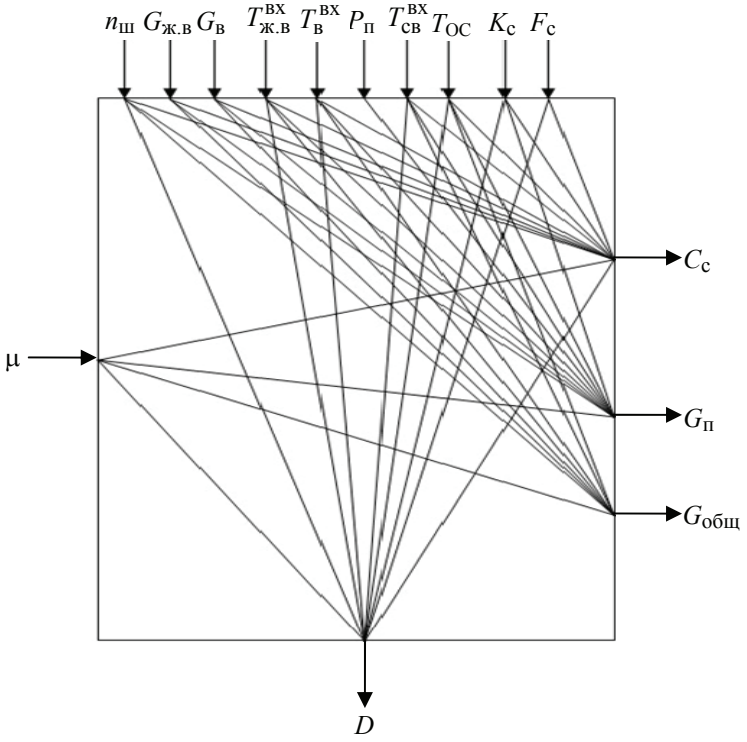


Рис. 3. Взаимосвязь параметров объекта управления

Постановка задачи управления

Цель управления – интенсификация процесса экстракции в условиях действия переменного качества сырья и температуры.

Задача управления технологическим процессом получения диффузионного сока сформулирована следующим образом:

– необходимо найти такой вектор управляющих воздействий $u = \{\mu^*\}$, при котором достигается минимум критерия оптимальности I с учетом воздействия возмущений

$$v = \left\{ n_ш, T^{вх}_{ж.в}, T^{вх}_в, P_п, T^{вх}_{св}, T_{ОС}, G_{ж.в}, G_в, K_с, F_с \right\}$$

и ограничений:

$$w = \left\{ C_с, G_п, t_д, G_{общ} \right\};$$

$$f(u, v, w) = \max_{u \in U} I; \quad (1)$$

$$u \in U; \quad (2)$$

$$v \in V; \quad (3)$$

$$w \in W, \quad (4)$$

где U, V, W – множество векторов соответственно управляющих и возмущающих воздействий, а также выходных величин.

В качестве критериев оптимальности рассмотрены концентрация сахарозы $C_с$ в выходящем из аппарата диффузионном соке и ее отклонение от заданного значения.

Анализ существующих подходов к управлению диффузионными аппаратами в сахарном производстве показал, что применяемые в них методы управления не обеспечивают увеличение и стабилизацию концентрации сахарозы в выходящем диффузионном соке и не являются достаточно эффективными в условиях воздействия возмущений, нестационарности и инерционности процессов.

Выявленные недостатки известных способов управления подобными процессами показали, что при большой инерционности обеспечивается необходимое качество регулирования только при малых возмущениях [12 – 18]. Главная причина состоит в неумении преодоления инерционности объекта.

Совершенствование управления процессом экстракции в наклонном шнековом диффузионном аппарате должно состоять в использовании системой управления:

– промежуточной выходной величины с меньшей инерционностью, что улучшит динамические характеристики системы;

– управляющих величин, определенных по математической модели процесса, учитывающей нестационарность процесса.

Усовершенствование системы управления состоит в следующем.

Для достижения цели управления предлагается принцип управления процессом экстракции в наклонном шнековом диффузионном аппарате, состоящий:

1) в выборе в качестве малоинерционной выходной величины коэффициента диффузии сахарозы, в большей степени определяемого температурой смеси в аппарате;

2) сведение задачи управления концентрацией сахарозы в выходящем из аппарата диффузионном соке к управлению коэффициентом диффузии сахарозы.

Для реализации данной концепции необходимо построить математическую модель, учитывающую нестационарность процесса, и разработать алгоритм управления.

Список литературы

1. Сапронов, А. Р. Технология сахарного производства / А. Р. Сапронов. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Колос, 1999. – 495 с.

2. Лысянский, В. М. Процесс экстракции сахара из свеклы. Теория и расчет / В. М. Лысянский. – М. : Пищевая промышленность, 1973. – 223 с.

3. Горбатюк, В. И. Процессы и аппараты пищевых производств / В. И. Горбатюк. – М. : Колос, 1999. – 335 с.

4. Кавецкий, Г. Д. Процессы и аппараты пищевой технологии / Г. Д. Кавецкий, В. П. Касьяненко. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : КолосС, 2008. – 591 с.

5. Бугаенко, И. Ф. Технологические отклонения в сахарном производстве. Причины, предупреждения, устранение / А. Коваржик, О. Бем, Й. Буреш [и др.] ; пер. с чеш. и ред. И. Ф. Бугаенко. – М. : Агропромиздат, 1986. – 262 с.

6. Силин, П. М. Технология сахара / П. М. Силин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Пищевая промышленность, 1967. – 624 с.

7. Иванец, В. Н. Процессы и аппараты пищевых производств : учеб. пособие / В. Н. Иванец, И. А. Бакин, С. А. Ратников. – Кемерово : Кемеровский технологический ин-т пищевой промышленности, 2004. – 180 с.

8. Болотов, В. М. Технология получения, свойства и применение пищевых красителей на основе природных антоциановых и каротиноидных соединений / В. М. Болотов, Е. В. Комарова, П. Н. Саввин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2018. – Т. 24, № 1. – С. 124 – 133. doi: 10.17277/vestnik.2018.01.pp.124-133

9. Казуб, В. Т. Особенности кинетики процесса экстрагирования под воздействием импульсного поля высокой напряженности / В. Т. Казуб, А. Г. Кошкарова, С. П. Рудобашта // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2018. – Т. 24, № 1. – С. 134 – 139. doi: 10.17277/vestnik.2018.01.pp.134-139

10. Промтов, М. А. Интенсификация процесса экстрагирования в роторном импульсном аппарате с профилированным ротором / М. А. Промтов, А. Ю. Степанов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2019. – Т. 25, № 1. – С. 86 – 91. doi: 10.17277/vestnik.2019.01.pp.086-091

11. Промтов, М. А. Критериальные зависимости для расчета процесса экстрагирования гуминовых кислот из торфа и биогумуса в роторном импульсном аппарате / М. А. Промтов, А. Ю. Степанов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2021. – Т. 27, № 2. – С. 263 – 274. doi: 10.17277/vestnik.2021.02.pp.263-274

12. Ладанюк, А. П. Оперативное управление технологическими процессами в пищевой промышленности / А. П. Ладанюк, В. Г. Перепечаенко. – Киев : Урожай, 1987. – 160 с.

13. Еременко, Б. А. Автоматическое управление процессами свеклосахарного производства / Б. А. Еременко. – М. : Пищевая промышленность, 1976. – 223 с.

14. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 1: Математические модели, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления / Под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 654 с.

15. Математические модели многосвязных объектов управления / М. Н. М. Саиф, В. Г. Матвейкин, Б. С. Дмитриевский [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2019. – Т. 25, № 1. – С. 53 – 62. doi: 10.17277/vestnik.2019.01.pp.053-062

16. Управление объектами с взаимосвязанными величинами / М. Н. М. Саиф, В. Г. Матвейкин, Б. С. Дмитриевский [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2019. – Т. 25, № 2. – С. 206 – 218. doi: 10.17277/vestnik.2019.02.pp.206-218

17. Управление сложными технологическими процессами на примере сушки в аппаратах псевдоожиженного слоя / М. Н. М. Саиф, В. Г. Матвейкин, Б. С. Дмитриевский [и др.] // Системы управления и информационные технологии. – 2020. – № 4 (82). – С. 55 – 58. doi: 10.36622/VSTU.2020.38.74.013

18. Разработка программного комплекса системы управления сложными производственными процессами / В. Г. Матвейкин, Б. С. Дмитриевский, А. А. Терехова [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2021. – Т. 27, № 2. – С. 168 – 184. doi: 10.17277/vestnik.2021.02.pp.168-184

The Analysis of a Multiple-Connected Technological Process as a Control Object Using the Example of Food Industries

V. G. Matveikin, B. S. Dmitrievsky, A. A. Terekhova, S. N. A. Al Knfer, M. A. D. Al-Amidi, O. H. Y. Al-Hamami, M. L. Gogoryan, D. G. Dmitriev

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

Keywords: diffusion installation; management task; control object; sugar production; technological process; control action; management goal.

Abstract: The paper consideres the improvement of the management of interconnected technological processes in food production, using the example of sugar extraction in diffusion plants. The methodological foundations of the process

of developing a control system are given. The features of the control object, the shortcomings of existing control systems are revealed, the relationship between input and output values is studied, control actions are determined, the conditions that must be observed when solving the control problem are taken into account.

References

1. Sapronov A.R. *Tekhnologiya sakharnogo proizvodstva* [Technology of sugar production], Moscow: Kolos, 1999, 495 p. (In Russ.)

2. Lysyanskiy V.M. *Protsess ekstraktsii sakhara iz svekly. Teoriya i raschet* [The process of extraction of sugar from beets. Theory and calculation], Moscow: Pishchevaya promyshlennost', 1973, 223 p. (In Russ.)

3. Gorbatyuk V.I. *Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv* [Processes and apparatuses for food production], Moscow: Kolos, 1999, 335 p. (In Russ.)

4. Kavetskiy G.D., Kas'yanenko V.P. *Protsessy i apparaty pishchevoy tekhnologii* [Processes and apparatuses of food technology], Moscow: KolosS, 2008, 591 p. (In Russ.)

5. Kovarzhik A., Bem O., Buresh Y. [et al.], Bugayenko I.F. [Ed.] *Tekhnologicheskiye otkloneniya v sakharnom proizvodstve. Prichiny, preduprezhdeniya, ustraneniye* [Technological deviations in sugar production. Causes, warnings, elimination], Moscow: Agropromizdat, 1986, 262 p. (In Russ.)

6. Silin P.M. *Tekhnologiya sakhara* [Technology of sugar], Moscow: Pishchevaya promyshlennost', 1967, 624 p. (In Russ.)

7. Ivanets V.N., Bakin I.A., Ratnikov S.A. *Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv: uchebnoye posobiye* [Processes and apparatuses of food production: a tutorial], Kemerovo: Kemerovskiy tekhnologicheskiy institut pishchevoy promyshlennosti, 2004, 180 p. (In Russ.)

8. Bolotov V.M., Komarova Ye.V., Savvin P.N. [Technology for obtaining, properties and use of food dyes based on natural anthocyanin and carotenoid compounds], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2018, vol. 24, no. 1, pp. 124-133, doi: 10.17277/vestnik.2018.01.pp.124-133 (In Russ., abstract in Eng.)

9. Kazub V.T., Koshkarova A.G., Rudobashta S.P. [Features of the kinetics of the extraction process under the influence of a high-intensity pulsed field], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2018, vol. 24, no. 1, pp. 134-139, doi:10.17277/vestnik.2018.01.pp.134-139 (In Russ., abstract in Eng.)

10. Promtov M.A., Stepanov A.Yu. [Intensification of the extraction process in a rotary impulse apparatus with a profiled rotor], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2019, vol. 25, no. 1, pp. 86-91, doi: 10.17277/vestnik.2019.01.pp.086-091 (In Russ., abstract in Eng.)

11. Promtov M.A., Stepanov A.Yu. [Criterial dependencies for calculating the process of extraction of humic acids from peat and biohumus in a rotary pulse apparatus], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2021, vol. 27, no. 2, pp. 263-274, doi: 10.17277/vestnik.2021.02.pp.263-274 (In Russ., abstract in Eng.)

12. Ladanyuk A.P., Perepechayenko V.G. *Operativnoye upravleniye tekhnologicheskimi protsessami v pishchevoy promyshlennosti* [Operational management of technological processes in the food industry], Kyiv: Urozhay, 1987, 160 p. (In Russ.)

13. Yeremenko B.A. *Avtomaticheskoye upravleniye protsessami sveklosakharnogo proizvodstva* [Automatic control of sugar beet production processes], Moscow: Pishchevaya promyshlennost', 1976, 223 p. (In Russ.)

14. Pupkov K.A., Yegupov N.D. *Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya T. 1: Matematicheskiye modeli, dinamicheskiye kharakteristiki i analiz sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Methods of classical and modern theory of automatic control. Vol. 1: Mathematical models, dynamic characteristics and analysis of automatic control systems], Moscow: Izdatel'stvo MGTU im. N. E. Baumana, 2004, 654 p. (In Russ.)

15. Saif M.N.M., Matveykin V.G., Dmitriyevskiy B.S., Bashkatova A.V., Mamontov A.A. [Mathematical models of multiply connected control objects], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2019, vol. 25, no. 1, pp. 53-62, doi: 10.17277/vestnik.2019.01.pp.053-062 (In Russ., abstract in Eng.)

16. Saif M.N.M., Matveykin V.G., Dmitriyevskiy B.S., Bashkatova A.V., Mamontov A.A. [Management 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.)

17. Saif M.N.M., Matveykin V.G., Dmitriyevskiy B.S., Terekhova A.A., Al' Knfer S.N.A. [Control of complex technological processes on the example of drying in fluidized bed apparatuses], *Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii* [Control systems and information technologies], 2020, no. 4 (82), pp. 55-58, doi: 10.36622/VSTU.2020.38.74.013 (In Russ., abstract in Eng.)

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

Analyse eines mehrfach verbundenen technologischen Prozesses als Kontrollobjekt am Beispiel von Lebensmittelproduktionen

Zusammenfassung: Am Beispiel der Zuckergewinnung in Diffusionsanlagen ist die Verbesserung der Steuerung vernetzter technologischer Prozesse in der Lebensmittelindustrie betrachtet. Die methodischen Grundlagen des Prozesses zur Entwicklung eines Steuerungssystems sind gegeben. Es sind die Merkmale des Kontrollobjekts, die Mängel bestehender Kontrollsysteme aufgedeckt, die Beziehungen zwischen Eingabe- und Ausgabewerten sind untersucht worden, Kontrollaktionen sind bestimmt, die Bedingungen, die bei der Lösung des Kontrollproblems eingehalten werden müssen, sind berücksichtigt.

Analyse du processus technologique multi-couplé en tant qu'objet de commande à l'exemple de la production alimentaire

Résumé: Est examiné le perfectionnement de la commande des processus technologiques interconnectés dans la production alimentaire, à l’exemple de l'extraction du sucre dans des installations de diffusion. Sont présentées les bases

méthodologiques du processus de l'élaboration du système de commande. Sont montrées les caractéristiques de l'objet de commande, les défauts des systèmes de commande existants; sont étudiées les relations entre les valeurs d'entrée et de sortie; sont définis les effets de commande; sont prises en compte les conditions à respecter lors de la résolution du problème de commande.

Авторы: ***Матвейкин Валерий Григорьевич*** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «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»; ***Аль Кнфер Самер Нахи Альван*** **–** аспирант кафедры «Информационные процессы и управление»; ***Аль-Амиди Мустафа Абдулкадим Дхаир*** **–** аспирант кафедры «Информационные процессы и управление»; ***Аль-Хамами Омар Хашим Яхья*** – аспирант кафедры «Информационные процессы и управление»; ***Гогорян Михаил Левонович*** – студент; ***Дмитриев Дмитрий Геннадьевич*** – студент, ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

УДК 675.92.028.3
DOI: 10.17277/vestnik.2022.04.pp.544-558

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВУЛКАНИЗАЦИИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

С. Г. Тихомиров[1], А. А. Маслов[1], О. В. Карманова[2], И. А. Хаустов[1], Е. В. Линцова[1], А. С. Олейник[1]

Кафедры: информационных и управляющих систем (1), tikhomirov_57@mail.ru; технологии органических соединений, переработки полимеров и техносферной безопасности (2), ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», Воронеж, Россия

Ключевые слова: автомобильная шина; вулканизация; математическое моделирование; программный комплекс; резиновая смесь.

Аннотация: Разработаны математический аппарат, устанавливающий взаимосвязь между составом эластомерной композиции и предполагаемыми свойствами вулканизата с учетом параметров процесса его изготовления, а также программный продукт для проведения научно-исследовательских работ по изучению вулканизации резиновых смесей с использованием многокомпонентных структурирующих систем. Реализованы алгоритмы расчета режимов вулканизации толстостенных армированных композитов, позволяющие при проектировании оценивать технологические возможности производства, планировать выбор материалов и оборудования. С использованием разработанного программного продукта дана оценка параметров процесса изотермической вулканизации.

Производство автомобильных шин – многостадийный процесс, который осуществляется на шинном заводе и включает анализ рынка, разработку цифровой модели и прототипа, производство резиновых смесей и полуфабрикатов, сборку, вулканизацию и контроль качества готовой продукции [1]. В настоящее время не существует эффективных методов, которые на основе информации о компонентах резиновых смесей позволяли бы прогнозировать свойства конечных продуктов. Существенное влияние на формирование структуры вулканизата оказывают концентрации исходных компонентов и параметры технологического процесса. В этом случае свойства конечных продуктов определяют по контрольным образцам, полученным из соответствующей партии. Необходимость прогнозирования свойств и поведения таких изделий в условиях их эксплуатации определяет создание новых подходов, основанных на глубоком теоретическом анализе и математическом описании [2, 3]. При моделировании структуры эластомеров перспективными могут быть такие подходы, в которых последовательно рассматриваются свойства каждого компонента композиции. Их практическая реализация при изготовлении изделий и эластомеров позволит снизить трудоемкость технологического процесса и стоимость готовой продукции, обеспечит качественное прогнозирование технологических и физико-механических свойств материалов [4].

Вулканизация – завершающий этап производства шин, на котором изделие из полуфабрикатов, состоящих из армирующих материалов и резиновых смесей, на вулканизационном оборудовании приобретает необходимую форму и новые свойства. В этом процессе тепло передается шине из формы, в которой поддерживается высокая температура за счет циркуляции теплоносителя. После завершения процесса вулканизации готовая шина вынимается из формы и охлаждается при комнатной температуре. В таблице 1 показан пример режима вулканизации пневматической шины. Данный процесс энергоемкий, и его оптимизация позволит не только производить шины высокого качества, но и увеличить объем выпускаемой продукции. Для оптимизации процесса вулканизации необходима соответствующая оценка распределения температурных полей в различных слоях шины во времени. Основной способ определения условий вулканизации заключается в использовании термопар, которые помещают в разные части сырой шины для измерения температуры и построения профилей температурных изменений во времени [5]. Однако данный подход является инертным и дорогостоящим. Поэтому производители шин ищут альтернативные методы, основанные на моделировании процесса с помощью методов конечных элементов, для прогнозирования распределения температуры и скорости вулканизации в объеме продукта.

Процесс вулканизации шины условно можно разделить на восемь этапов, что сложнее, чем процесс изготовления полуфабрикатов. Метод с использованием термопар не предсказывает степень вулканизации в произвольном месте шины, поскольку изменения температуры могут быть получены только в том месте, где расположена термопара. Данный процесс представляет собой сложную процедуру теплового взаимодействия «жидкость – твердое тело», и для получения точных решений необходимо использовать метод конечных элементов [5, 6]. Поэтому необходимо разработать альтернативный метод температурного контроля процесса вулканизации с учетом состава резиновых смесей.

Цель работы – разработка математического аппарата, устанавливающего взаимосвязь между составом эластомерной композиции и прогнозируемыми свойствами готовой резиновой смеси с учетом параметров ее изготовления и обработки.

Таблица 1

Режим вулканизации пневматических шин

Операция	Давление, МПа	Время, мин	Температура пара, °С
Закрытие формы	сегментная форма 150 °С / боковая пластина 140 °С		
Заполнение паром	0,8…1,2	8	178
Первая заливка воды		2	
Заполнение горячей водой:			
цикл	2,4…3,0	77	165
без цикла		70	165
Слив воды	0,5	2	–
	0		
Вакуумирование	–		
Общее время цикла		163	

Структура программного обеспечения

Для исследования процессов вулканизации эластомерных композиций на основе математического моделирования разработано программное обеспечение. Приложение включает программные модули компьютерного моделирования вулканизации эластомерных композиций: симуляции процесса; расчета управляющих параметров; прогнозирования свойств полимерных композиций; накопления базы данных экспериментов и расчетов.

В каждом модуле реализованы алгоритмы обработки данных в соответствии с выбранным режимом: моделирование процессов теплопередачи и кинетики процесса вулканизации; расчет управляющих воздействий технологического процесса; режим сбора статистических данных. На рисунках 1 – 3 изображены схемы взаимодействий и основная логика реализованных модулей программной среды.

Режим моделирования теплопередачи в резиновых изделиях предназначен для расчета температурных полей и оценки теплофизических параметров эластомерной композиции. Методы расчета основаны на использовании математической модели, представленной уравнением теплопроводности с заданными начальными и граничными условиями [7]:

$$C(T)\frac{\partial T(l,t)}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial l}\left\{\lambda(T)\frac{\partial T(l,t)}{\partial l}\right\}+q(l,t),\quad l\in[0,L],\quad t\in[0,t_k]; \tag{1}$$

$$T(l,0)=T_0(l),\quad l\in[0,L]; \tag{2}$$

$$T(0,t)=T_{\text{в}}(t),\quad T(L,t)=T_{\text{н}}(t),\quad t\in[0,t_k]. \tag{3}$$

где $C(T)$ – коэффициент объемной теплоемкости образца, Дж/(м^3·К); $T(l, t)$ – температура, К; L – толщина образца, м; t_k – конечный момент времени, с; $T_{\text{в}}(t)$, $T_{\text{н}}(t)$ – значения температур на верхней и нижней частях резинового образца, К; $\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности образца, Вт/(м·К), $q(l, t)$ – плотность тепловыделения, Вт/м^3.

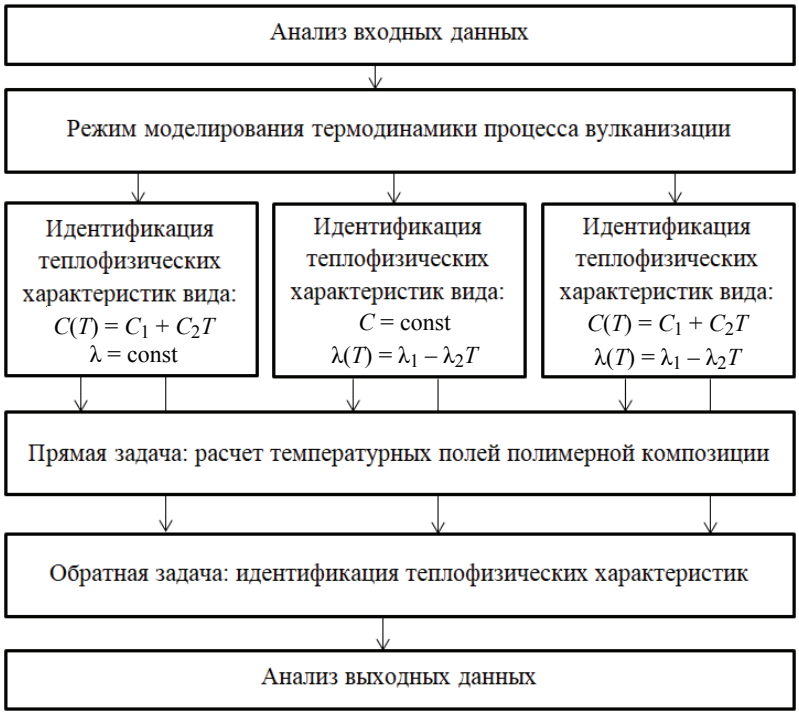
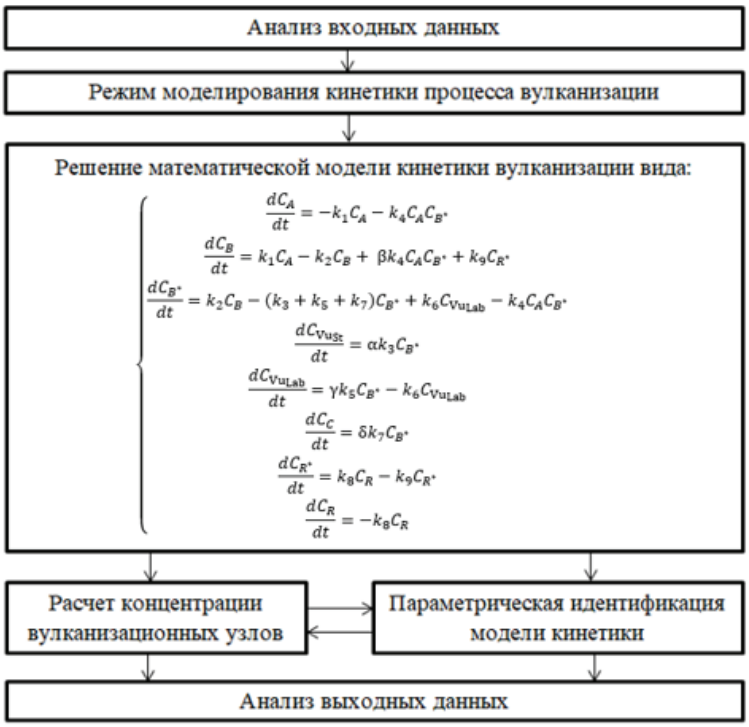


Рис. 1. Схема подсистемы моделирования термодинамики вулканизации



а)

б)

Рис. 2. Схема подсистемы моделирования кинетики вулканизации (*а*) и расчета оптимальных управляющих параметров (*б*)

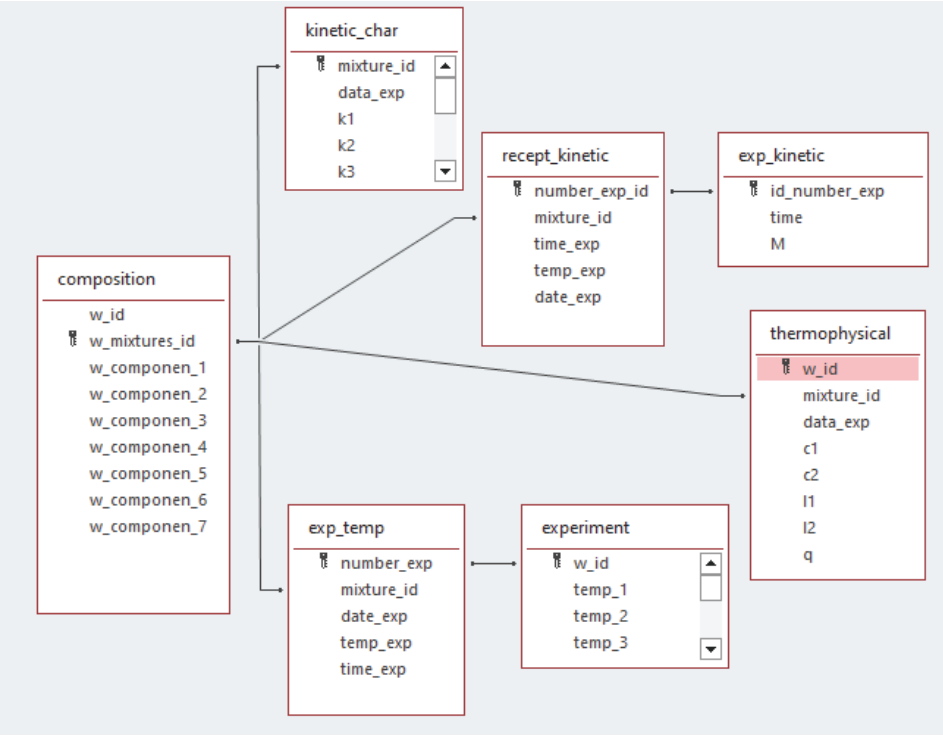


Рис. 3. Инфологическая модель модуля накопления статистических данных

В программе реализованы алгоритмы расчета коэффициентов теплопроводности и теплоемкости эластомерных композиций в зависимости от температуры по экспериментальным данным (рис. 4). Исследователь выбирает, с помощью какого вида аппроксимирующей зависимости проводить оценку теплофизических параметров. В частности, устанавливаются начальная температура вулканизации; расчетное значение коэффициента теплоемкости и априорные значения параметров аппроксимирующей функции теплопроводности в зависимости от температуры; толщина изделия; общая продолжительность процесса. Программа проводит расчеты температурных кривых изделия на разных его уровнях, в результате которых формируется массив температур и выводятся графики. Погрешность расчетных значений относительно экспериментальных данных рассчитывается автоматически и выводится на экран пользователя по завершению построения результатов. Для сохранения и дальнейшего анализа полученных данных предусмотрен импорт во встроенную подсистему статистических накоплений. При работе с программой рекомендовано использовать натурные образцы в форме цилиндра с теплоизолированной боковой поверхностью.

В режиме моделирования имеется возможность расчета степени вулканизации многослойных изделий (как при изотермических, так и неизотермических условиях протекания процесса). В основу модели положена система дифференциальных уравнений (см. рис. 2, *а*). Кинетические реакции в процессе вулканизации изображены на рис. 5, где A – действительный агент вулканизации; B – предшественник сшивания; B* – активная форма предшественника сшивания; C – внутримолекулярносвязанная сера; Vu_{St}, Vu_{Lab} – стабильные и лабильные узлы вулканизационной сетки; R – каучук; R* – макрорадикал каучука, образованный в результате термофлуктуационного распада; α, β, γ и δ – стехиометрические коэффициенты; k_1, k_2, ..., k_8, k_9 – константы скоростей реакций.

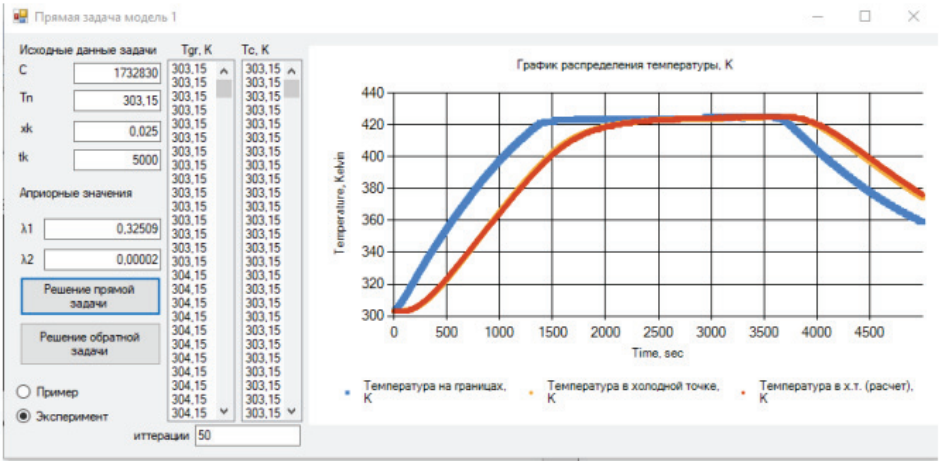


Рис. 4. Режим моделирования. Расчет теплофизических коэффициентов

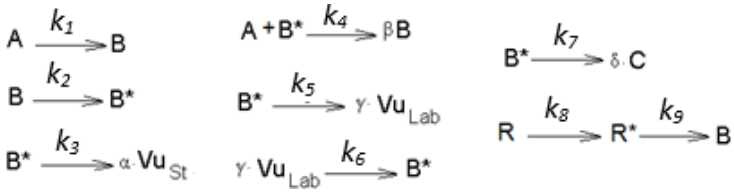


Рис. 5. Кинетические реакции в процессе вулканизации

Начальная концентрация действительного агента вулканизации определяется формулой

$$[\text{ДАВ}] = \xi[\text{S}_8][\text{A}_\text{c}][\text{Akt}]^{\theta}[\text{R}]^{\eta}, \tag{5}$$

где ξ, θ, η – стехиометрические коэффициенты; $[\text{S}_8]$, $[\text{A}_\text{c}]$, [Akt], [R] – начальные концентрации соответственно серы, ускорителя вулканизации, активатора вулканизации, макрорадикала каучука, моль/кг.

Решение задачи идентификации кинетических параметров осуществляется путем минимизации целевой функции (6):

$$\Phi(k_1, k_2, ..., k_8, k_9, \alpha, \beta, \gamma, \xi, \theta, \eta) = \int_0^{t_k} q^2(k_1, k_2, ..., k_8, k_9, \alpha, \beta, \gamma, \xi, \theta, \eta, t)\, dt; \tag{6}$$

$$q(k_1, k_2, ..., k_8, k_9, \alpha, \beta, \gamma, \xi, \theta, \eta, t) = \frac{R(M(t) - M_{\min})}{M_{\max} - M_{\min}} - C_{\text{Vu}_{\text{st}}}, \tag{7}$$

где $M_{\max}$, $M_{\min}$ – соответственно максимальное и минимальное значение крутящего момента $M(t)$; R – масштабный коэффициент; $C_{\text{Vu}_{\text{st}}}$ – концентрация стабильных вулканизационных узлов.

Режим расчета управляющих воздействий реализует численное моделирование процесса вулканизации на основе решения двух взаимосвязанных задач: определения температурного поля в изделии и расчета степени завершенности процесса. Алгоритмы решения заключаются в последовательном расчете температурных полей на каждом участке образца. На основании данных о температуре рассчитывается степень вулканизации $X(l, t)$. Выражение для плотности тепловыделения содержит величину $X(l, t)$, характеризующую степень завершенности

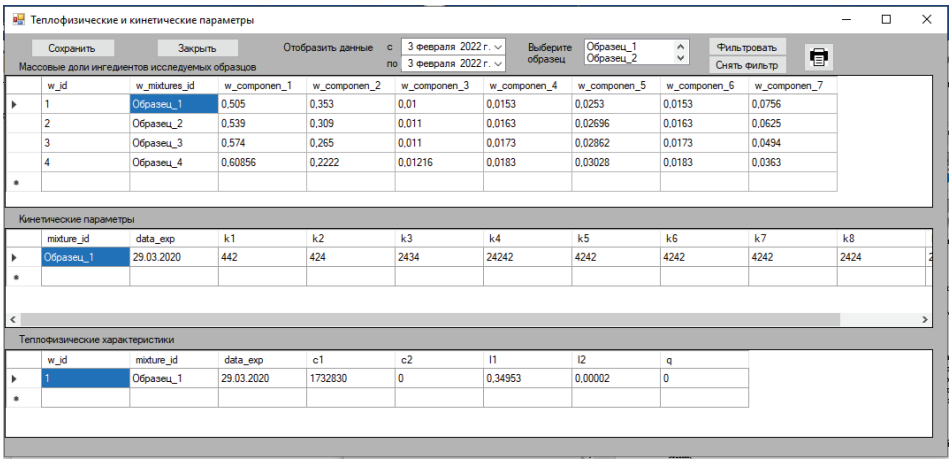


Рис. 6. Окно базы данных накопления расчетных значений параметров модели кинетики и теплофизических характеристик

процесса вулканизации. Степень завершенности процесса можно определить как отношение концентрации вулканизационных узлов к его максимальному значению. В результате модуль позволяет на основе экспериментальных данных подбирать температурно-временные режимы процесса с учетом рецепта полимерной композиции и условий проведения процесса.

В системе реализована база данных экспериментов и результатов расчетов различных режимов, где: composition – массовые доли ингредиентов состава смеси; exp_temp – условия и дата проведения эксперимента на лабораторной установке; experiment – данные с термопар; recept_kinetic – условия и дата эксперимента на реометре; exp_kinetic – показания реометра; thermophysical – теплофизические параметры; kinetic_char – кинетические характеристики (см. рис. 3).

В качестве примера показано окно базы данных для накопления расчетных параметров модели кинетики и теплофизических характеристик (рис. 6).

Программный комплекс целесообразно использовать в процессах производства автомобильных покрышек на этапах лабораторных исследований, что существенно позволит увеличить производственные объемы выпускаемой продукции за счет подбора оптимальных температурно-временных параметров технологического процесса.

Эксперимент и обработка результатов

С целью демонстрации работы программного обеспечения научных исследований процессов вулканизации приведен алгоритм действий для идентификации констант кинетики, на основе экспериментальных данных. В общем виде последовательность действий исследования следующая:

1) подготовка рецепта, изготовление эластомерной композиции и снятие показаний на реометре контрольного образца;
2) оценка начальных концентраций;
3) обработка реометрической кривой;
4) определение концентраций поперечных связей в текущий момент времени;
5) идентификация констант с помощью программного обеспечения;
6) анализ результатов.

Реограммы описывают вулканизационную кривую. Оцифровка может происходить вручную или с помощью специальных программ (например, Gr2Digit). В таблице 1 представлен принципиальный рецепт (полимерная основа и вулканизующая группа) резиновой смеси контрольного примера, использующийся в производстве протектора автомобильной шины.

Таблица 1

Рецепт эластомерной композиции контрольного примера «Протектор шины»

Назначение/группа	«Протектор шины»	
	Наименование	Вес, кг
Полимерная основа	СКДН	30,579
Активатор вулканизации	Оксид цинка	2,132
Ускоритель вулканизации	TBBS	1,421
Вулканизирующий агент	Сера	1,35

Экспериментальные исследования контрольных образцов проводили при температуре 443,15 К и продолжительности вулканизации 10 минут. Зависимость изменения крутящего момента резиновой смеси в ходе вулканизации представлена на рис. 7. Из-за особенностей исследования на реометре анализу подвергают несколько контрольных образцов, чтобы оценить равномерность протекания процесса и исключить погрешности испытания.

Полученные данные необходимо обработать, нормировать. Первоначально крутящий момент переводят в условные единицы

$$M_{\text{усл}} = \frac{M_{\text{тек}} - M_{\min}}{M_{\max} - M_{\min}}. \tag{8}$$

Затем условные единицы переводят в концентрации поперечных связей, моль/кг:

$$C_{\mathrm{Vu}_{\mathrm{st}_i}} = M_{\text{усл}_i} R, \quad i = 0, ..., n, \tag{9}$$

где $R = 5 \cdot 10^{-19}$ – масштабный коэффициент; n – число точек в массиве данных по времени.

Согласно формуле (5) для оценки концентрации действительного агента вулканизации необходимо знать начальные концентрации серы, ускорителя, активатора и макрорадикалов каучука, после перевода их в мольные концентрации данные параметры принимают следующие значения, моль/кг:

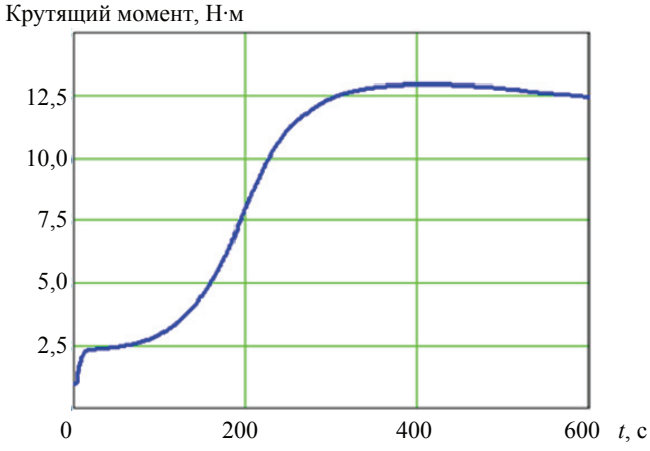


Рис. 7. График экспериментальных кривых вулканизации с реометра после оцифровки

$[S_8] = 0{,}033415087$;

$[A_c] = 0{,}26798075$;

$[Akt] = 0{,}166782689$;

$[R] = 0{,}003032264$.

В расчетной формуле действительного агента вулканизации присутствуют коэффициенты ξ, θ, η, которые необходимо идентифицировать.

Оцифрованные и обработанные экспериментальные данные вводятся в программу, выбираются начальные условия, приближения, диапазон поиска констант. Результаты идентификации для контрольного образца представлены в табл. 2 и на рис. 8, 9.

Таблица 2

Оценка констант модели для контрольного образца «Протектор шины» при температуре вулканизации 443,15 K

Параметр, c^{-1} (k_4, кг·c^{-1}/моль)	Значение	Параметр	Значение
k_1	0,009388	α	1
k_2	0,02046	β	2
k_3	$4{,}216e^{-21}$	γ	1
k_4	0,00834	ξ	1,65
k_5	$1{,}228e^{-22}$	θ	1,5
k_6	$1{,}667e^{-22}$	η	0
k_7	0,02129		
k_8	0,01998		
k_9	0,02285		

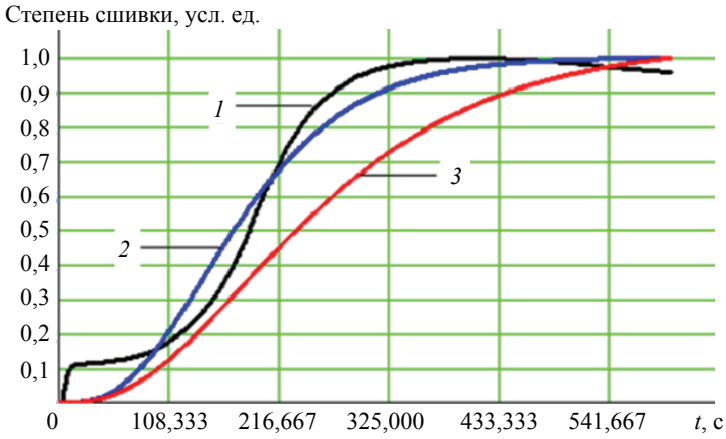


Рис. 8. Графики реометрических кривых в условных единицах:
1 – эксперимент; *2* – график расчетных значений после идентификации параметров модели; *3* – расчет из априорных приближений

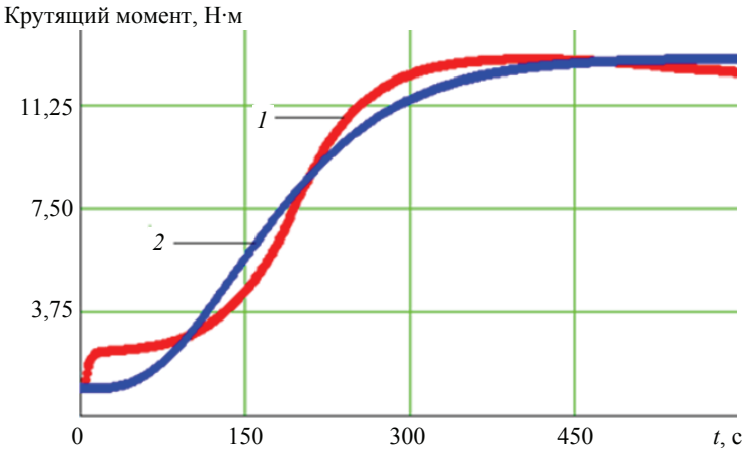


Рис. 9. Графики реометрических кривых:
1 – эксперимент; *2* – расчет

В результате идентификации параметров модели и оценки погрешности можно сделать вывод, что предложенная модель адекватно описывает кинетику изотермической вулканизации. Средняя относительная погрешность для контрольного примера составила 4,86 %.

Анализируя современные подходы к моделированию процессов вулканизации, а также производство изделий из эластомерных композиций, можно сделать вывод, что основными факторами, влияющими на формирование пространственной вулканизационной структуры, являются условия проведения вулканизации (теплоносители и энергоносители), физические параметры (давление, температура; продолжительность процесса) и состав композиции. С точки зрения тепловых условий вулканизация происходит при переменных температурах и характеристиках теплопередачи [8, 9]. Наиболее часто используемые каучуки (бутадиен-стирольные, бутадиеновые, изопреновые) вулканизуются серой, атомы которой участвуют в образовании межмолекулярных поперечных связей. Основные температурные режимы вулканизации резиновых изделий осуществляются при 413,15…443,15 К. При вулканизации наблюдается неоднородный температурный профиль в объеме толстостенных изделий. С повышением температуры продолжительность вулканизации уменьшается, но для многослойных крупногабаритных изделий увеличивается вероятность перевулканизации на поверхности готовых изделий и неравномерного распределения сшивки по толщине. Таким образом, ухудшается качество продукции [10].

Внешнее давление, действующее на продукт, существенно влияет на повышение прочности резины. С увеличением давления пористость резины уменьшается, а прочность связи между слоями увеличивается. Для обеспечения высокой производительности промышленного оборудования вулканизацию необходимо проводить в максимально короткие промежутки времени. Поскольку за счет поглощенного тепла процесс вулканизации продолжается после окончания нагрева. Данное обстоятельство необходимо учитывать при определении параметров процесса. Для повышения однородности температурного поля процесс нагрева можно проводить со ступенчатым или предварительным нагревом исходной резиновой смеси. Поэтому желательно не добиваться полной вулканизации эластомера [10]. Временные и температурные условия вулканизации зависят от природы каучука и исходного состава эластомерной композиции. Основными параметрами процесса являются время индукционного периода, оптимум вулканизации – время, за которое достигаются требуемые физико-механические свойства вулканиза-

тов, плато вулканизации – интервал времени, в течение которого сохраняются требуемые физико-механические показатели вулканизата. При выборе температурно-временных параметров процесса в основном используется эмпирический подход, не позволяющий получить достоверно воспроизводимые результаты и расчетные режимы изготовления изделий с оптимальными свойствами на достаточно высоком научно-техническом уровне [11]. В промышленных условиях режим вулканизации выбирается на основании расчетных и экспериментальных методов, обеспечивающих выбор программы реализации процесса. При этом для выполнения выбранных режимов необходимо оборудовать процесс средствами автоматизации и контроля, обеспечивающими проведение выбранной процедуры.

Результат аналитического обзора различных подходов к описанию структурирования эластомеров показал, что на сегодняшний день не существует единого подхода к описанию процесса неизотермической вулканизации и общей методики оценки вулканизационных характеристик и свойств вулканизатов, которая позволила бы осуществлять подбор оптимального температурно-временного режима вулканизации [12, 13]. В настоящее время изучение и расчет процессов вулканизации основывается в основном на результатах натурного эксперимента, эмпирических и графоаналитических методах расчетов, а их обобщенный анализ отсутствует. Опыт исследований в данной области науки показывает необходимость использования расчетных методов для определения оптимального режима вулканизации, а также лежащих в их основе математических моделей и алгоритмов.

Заключение

На основе анализа теоретических подходов к описанию вулканизации усовершенствована общая кинетическая схема процесса вулканизации. Предложены дополнительные реакции, описывающие образование и деструкцию лабильных полисульфидных связей, внутримолекулярную циклизацию и другие реакции, приводящие к модификации макромолекул каучука, образованию макрорадикала и его реакцию с подвесками действительного агента вулканизации. Математическая модель структурирования дополнена начальными условиями, которые определены как функции исходных концентраций компонентов вулканизующей группы.

Разработан программный продукт, предназначенный для проведения научно-исследовательских работ при изучении процессов вулканизации резиновых смесей с использованием многокомпонентных структурирующих систем. Комплекс программ имеет модульную структуру, что позволяет осуществлять его расширение без потери функциональности. Направлением его модернизации является включение в состав математического описания неизотермического режима вулканизации с дальнейшей интеграцией в контур. С использованием разработанного программного продукта осуществлена оценка параметров процесса изотермической вулканизации на контрольном примере рецептуры «Протектор шины». Максимальное отклонение от экспериментальных данных не превышает 5 %, что свидетельствует о точности модели.

Список литературы

1. Шины. Некоторые проблемы эксплуатации и производства / Р. С. Ильясов, В. Дорожкин, Г. Я. Власов, А. А. Мухутдинов. – Казань : Изд-во Казанского гос. технологического ун-та, 2000. – 576 с.

2. Khang, T. Vulcanization Kinetics Study of Natural Rubber Compounds Having Different Formulation Variables / T. Khang, Z. Ariff // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2012. – Vol. 109. – P. 1545 – 1553.

3. Wang, Dh. Mathematical modelling and numerical simulation of the non-isothermal in-mold vulcanization of natural rubber / Dh. Wang, Q. Dong, Y. X. Jia // Chinese Journal of Polymer Science. – 2015. – Vol. 33. – P. 395 – 403. doi: 10.1007/s10118-015-1594-2

4. Повышение эффективности процесса вулканизации шин / В. К. Гордеев, В. Пороцкий, В. Савельев, Т. Алдонина // Вопросы практической технологии производства шин. – 2000. – № 1 (50). – С. 85 – 98.

5. Маркелов, В. Г. Моделирование процесса вулканизации толстостенных резинотехнических изделий / В. Г. Маркелов, М. Е. Соловьев // Изв. высш. учеб. заведений. Серия: Химия и хим. технология. – 2007. – Т. 50, № 4. – С. 95 – 98.

6. Фищенков, А. Н. Использование метода конечных элементов при математическом моделировании процесса вулканизации шин / А. Н. Фищенков // Изв. высш. учеб. заведений. Северо-Кавказский регион. Техн. науки. – 2007. – № 6 (142). – С. 45 – 48.

7. Расчет температурных полей пневматических шин в процессе вулканизации / Ю. В. Пятаков, С. Г. Тихомиров, О. В. Карманова, А. А. Маслов // Проблемы шин, РТИ и эластомерных композитов : сб. науч. тр. XXVII междунар. симпозиума, 10 – 14 октября 2016 г., Москва. – М., 2016. – С. 405 – 413.

8. Павлов, В. В. Разработка методики оптимизации тепловых режимов вулканизации резиновых покрытий / В. В. Павлов, Ю. Р. Осипов, С. Ю. Осипов // Вестн. Череповецкого гос. ун-та. – 2008. – № 3 (18). – С. 104 – 111.

9. Современное состояние мирового производства неформовых и формованных резинотехнических изделий. Аналитическая обзорная информация. – М. : НИИЭМИ, 2005. – 233 с.

10. Теплофизические свойства компонентов горючих систем : справ. / Ю. Э. Шелудяк, Л. Я. Кашпоров, Л. А. Малинин, В. Н. Цалков. – М. : НПО Информ ТЭИ, 1992. – 184 с.

11. Вулканизация эластомеров / Под ред. Г. Аллигера, И. Сьетуна ; пер. с англ. А. А. Донцова. – М. : Химия, 1967. – 428 с.

12. Milani, G. Optimization of Extrusion Production Lines for EPDM Rubber Vulcanized with Sulphur: A Two-Phase Model Based on Finite Elements and Kinetic Second Order Differential Equation / G. Milani, F. Milani // Computers & Chemical Engineering. – 2012. – Vol. 43. – P. 173 – 190. doi: 10.1016/j.compchemeng.2012.04.006

13. Методика расчета оптимального времени вулканизации резиновых смесей / А. А. Маслов, О. В. Карманова, С. Г. Тихомиров, И. А. Хаустов // Проблемы шин, РТИ и эластомерных композитов : сб. науч. тр. XXVIII междунар. симпозиума, 15 – 19 октября 2018 г., Москва. – М., 2018. – С. 258 – 264.

14. Методика расчета кинетики процесса неизотермической вулканизации крупногабаритных изделий / С. Г. Тихомиров, Ю. А. Пятаков, О. В. Карманова [и др.] // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2017. – № 10. – С. 9 – 12.

Software for Investigation of Polymer Composition Vulcanization Processes Using Mathematical Modeling

S. G. Tikhomirov[1], A. A. Maslov[1], O. V. Karmanova[2], I. A. Khaustov[1], E. V. Lintsova[1], A. S. Oleinik[1]

Department of Information and Control Systems (1), tikhomirov_57@mail.ru; Department of Technology of Organic Compounds, Polymer Processing and Technosphere Safety (2), Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russia

Keywords: automobile tire; curing; math modeling; software package; rubber compound.

Abstract: A mathematical apparatus has been developed to establish the relationship between the composition of the elastomeric composition and the expected properties of the vulcanizate, given the parameters of the process of its manufacture, as well as a software product to conduct research work on the study of the vulcanization of rubber compounds using multicomponent structuring systems. Algorithms for calculating the vulcanization modes of thick-walled reinforced composites have been implemented, making it possible to evaluate process capabilities of production during design, plan the choice of materials and equipment. Using the developed software product, the parameters of the isothermal vulcanization process were evaluated using a test example of the "Tire Protector" formulation.

References

1. Il'yasov R.S., Dorozhkin V., Vlasov G.Ya., Mukhutdinov A.A. *Shiny. Nekotoryye problemy ekspluatatsii i proizvodstva* [Tires. Some problems of operation and production], Kazan: Izdatel'stvo Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta, 2000, 576 p. (In Russ.)

2. Khang T., Ariff Z. Vulcanization Kinetics Study of Natural Rubber Compounds Having Different Formulation Variables, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2012, vol. 109, pp. 1545-1553.

3. Wang Dh., Dong Q., Jia Y.X. Mathematical Modelling and Numerical Simulation of the Non-Isothermal In-Mold Vulcanization of Natural Rubber, *Chinese Journal of Polymer Science*, 2015, vol. 33, pp. 395-403, doi: 10.1007/s10118-015-1594-2

4. Gordeyev V.K., Porotskiy V., Savel'yev V., Aldonina T. [Increasing the efficiency of the tire vulcanization process], *Voprosy prakticheskoy tekhnologii proizvodstva shin* [Questions of practical tire production technology], 2000, no. 1 (50), pp. 85-98. (In Russ.)

5. Markelov V.G., Solov'yev M.Ye. [Modeling of the process of vulcanization of thick-walled rubber products], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [News of higher educational institutions. Series: Chemistry and chemical technology], 2007, vol. 50, no. 4, pp. 95-98. (In Russ., abstract in Eng.)

6. Fishchenkov A.N. [The use of the finite element method in mathematical modeling of the tire vulcanization process], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskiye nauki* [News of higher educational institutions. North Caucasian region. Technical science], 2007, no. 6 (142), pp. 45-48. (In Russ., abstract in Eng.)

7. Pyatakov Yu.V., Tikhomirov S.G., Karmanova O.V., Maslov A.A. *Problemy shin, RTI i elastomernykh kompozitov* [Problems of tires, rubber goods and elastomer composites], Collection of Scientific Papers of the XXVII International Symposium, 10-14 October, 2016, Moscow, 2016, pp. 405-413. (In Russ.)

8. Pavlov V.V., Osipov Yu.R., Osipov S.Yu. [Development of methods for optimizing the thermal regimes of vulcanization of rubber coatings], *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Cherepovets State University], 2008, no. 3 (18), pp. 104-111. (In Russ.)

9. *Sovremennoye sostoyaniye mirovogo proizvodstva neformovykh i formovannykh rezinotekhnicheskikh izdeliy. Analiticheskaya obzornaya informatsiya* [The current state of the world production of non-molded and molded rubber products. Analytical review information], Moscow: NIIEMI, 2005, 233 p. (In Russ.)

10. Sheludyak Yu.E., Kashporov L.Ya., Malinin L.A., Tsalkov V.N. *Teplofizicheskiye svoystva komponentov goryuchikh sistem: spravochnik* [Thermophysical properties of combustible system components: a handbook], Moscow: NPO Inform TEI, 1992, 184 p. (In Russ.)

11. Alliger G., S'yetun I. [Eds.] *Vulkanizatsiya elastomerov* [Elastomer Vulcanization], Moscow: Khimiya, 1967, 428 p. (In Russ.)

12. Milani G., Milani F. Optimization of Extrusion Production Lines for EPDM Rubber Vulcanized with Sulphur: A Two-Phase Model Based on Finite Elements and Kinetic Second Order Differential Equation, *Computers & Chemical Engineering*, 2012, vol. 43, pp. 173-190, doi: 10.1016/j.compchemeng.2012.04.006

13. Maslov A.A., Karmanova O.V., Tikhomirov S.G., Khaustov I.A. *Problemy shin, RTI i elastomernykh kompozitov* [Problems of tires, rubber products and elastomer composites], Collection of Scientific Papers of the XXVIII International Symposium, 15-19 October, 2018, Moscow, 2018, pp. 258-264. (In Russ., abstract in Eng.)

14. Tikhomirov S.G., Pyatakov Yu.A., Karmanova O.V., Maslov A.A., Khaustov I.A., Podval'nyy S.L. [Method for calculating the kinetics of the process of non-isothermal vulcanization of large-sized products], *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye* [Chemical and oil and gas engineering], 2017, no. 10, pp. 9-12 (In Russ.)

Software zur Untersuchung der Vulkanisierungsprozesse von Polymerzusammensetzungen mittels mathematischer Modellierung

Zusammenfassung: Es sind ein mathematisches Gerät, das die Beziehung zwischen der Elastomerzusammensetzung und den erwarteten Eigenschaften des Vulkanisats unter Berücksichtigung der Parameter des Herstellungsprozesses feststellt, sowie ein Softwareprodukt für die Durchführung von Forschungsarbeiten bei der Untersuchung der Vulkanisation von Kautschukmischungen unter Verwendung von Mehrkomponenten-Strukturierungssystemen entwickelt. Es sind Algorithmen zur Berechnung der Vulkanisationsmodi von dickwandigen verstärkten Verbundwerkstoffen implementiert, die es ermöglichen, die technologischen Fähigkeiten der Produktion während des Entwurfs zu bewerten und die Auswahl von Materialien und Ausrüstung zu planen. Unter Verwendung des entwickelten Softwareprodukts sind die Parameter des isothermen Vulkanisationsprozesses anhand eines Testbeispiels «Reifenschutz» bewertet.

Le logiciel pour les études des processus de la vulcanisation des compositions polymères à l'aide de la simulation mathématique

Résumé: Sont élaborés un appareil mathématique établissant la relation entre le contenu de la composition élastomère et les propriétés supposées du vulcanisat, en tenant compte des paramètres du processus de fabrication, ainsi qu'un produit logiciel pour les travaux de recherche sur l'étude de la vulcanisation des mélanges

de caoutchouc à l'aide de systèmes de structure multicomposants. Sont réalisés les algorithmes de calcul des modes de vulcanisation des composites renforcés à parois épaisses ce qui permet d'évaluer les capacités technologiques de production, de planifier le choix des matériaux et des équipements lors de la conception. Sont évalués les paramètres du procédé de vulcanisation isotherme à l'aide d'un produit logiciel élaboré à l'exemple de test de la formule “Protecteur des pneus”.

Авторы: ***Тихомиров Сергей Германович*** **–** доктор технических наук, профессор кафедры информационных и управляющих систем; ***Маслов Александр Александрович*** **–** кандидат технических наук, доцент кафедры информационных и управляющих систем; ***Карманова Ольга Викторовна*** – доктор технических наук, профессор кафедры технологии органических соединений, переработки полимеров и техносферной безопасности; ***Хаустов Игорь Анатольевич*** **–** доктор технических наук, профессор кафедры информационных и управляющих систем; ***Линцова Елена Викторовна*** **–** аспирант кафедры информационных и управляющих систем; ***Олейник Александр Сергеевич*** – студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», Воронеж, Россия.

УДК 536.2
DOI: 10.17277/vestnik.2022.04.pp.559-572

МЕТОДОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ И РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ СПОСОБОВ И УСТРОЙСТВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ НА ПРИМЕРЕ МЕТОДА ПЛОСКОГО ИМПУЛЬСНОГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛОТЫ

С. В. Пономарев[1], В. О. Буланова[2], Е. В. Буланов[3]

Кафедра «Мехатроника и технологические измерения»,
svponom@yahoo.com; ФГБОУ ВО «ТГТУ» (1);
АО «Тамбовский завод «Октябрь» (2); ООО «РАСК» (3), Тамбов, Россия

Ключевые слова: измерение; конструкционный размер; коэффициент температуропроводности; метод; обработка данных; оптимизация; погрешности; плоский тепловой импульс; режимные параметры; теплопроводность.

Аннотация: Рассмотрены методические рекомендации по применению теории теплопроводности, методов математической метрологии и теории погрешностей для получения записи целевой функции, постановки и последующего решения задачи оптимизации методов и устройств для измерения теплофизических свойств веществ. Приведен пример применения данных рекомендаций при разработке метода плоского импульсного источника теплоты для контроля теплофизических свойств твердых материалов.

Введение

Выбор оптимальных значений как основных конструкционных размеров устройств, так и значений режимных параметров методов измерения теплофизических свойств (**ТФС**) веществ значительно повышает успех выполнения работ по проектированию и разработке новых методов и устройств, обладающих улучшенными метрологическими характеристиками.

В ФГБОУ ВО «ТГТУ» накоплен опыт [1 – 11] проектирования методов и устройств для измерения ТФС веществ на основе решения задач оптимизации с использованием целевых функций, для получения которых (с применением методов математической метрологии, теории погрешностей и математической физики) следует использовать следующие методические рекомендации о практическом порядке выполнения действий:

1) представить в виде словесного описания, схемы или чертежа физическую модель устройства [1 – 5, 7 – 11] для осуществления проектируемого и разрабатываемого метода измерения ТФС веществ;

2) записать постановку прямой краевой задачи теплопроводности, описывающей температурное поле внутри образца материала при проведении экспериментального измерения ТФС с применением методов математической физики (чаще всего, методов теории теплопроводности); примеры таких работ проведены в публикациях [1 – 3, 5 – 7, 10, 11];

3) получить ее аналитическое решение в виде формул, позволяющих рассчитывать температурное поле внутри образца исследуемого материала путем решения прямой краевой задачи теплопроводности, например так, как это показано в [1 – 3, 5 – 7, 10, 11, 14, 16];

4) получить расчетные формулы для вычисления искомых ТФС по экспериментальным данным, определяемым в процессе измерения этих ТФС, на основе решения прямой краевой задачи теплопроводности [1 – 3, 5 – 7, 10, 11]; иногда возможно получение расчетных формул на основе постановки прямой краевой задачи теплопроводности без использования ее аналитического решения [1, 10, 11];

5) путем применения методов математической метрологии и теории погрешностей [1 – 7, 13] на базе полученных расчетных формул для вычисления искомых ТФС надо получить целевые функции (в виде формул для вычисления среднеквадратичных оценок относительных погрешностей косвенных измерений искомых ТФС), обычно зависящие: а) от режимных параметров проведения процесса измерения; б) основных конструкционных размеров измерительного устройства; в) параметров применяемого алгоритма обработки экспериментальных данных; г) погрешностей измерения физических величин, непосредственно определяемых в процессе эксперимента;

6) в дальнейшем формулы (для вычисления среднеквадратичных оценок относительных погрешностей косвенных измерений искомых ТФС) используют в качестве целевых функций при математическом моделировании погрешностей измерения ТФС [1 – 7] и решении задач оптимизации методов и устройств для измерения искомых ТФС; в результате решения задачи оптимизации, как правило, определяют наилучшие (обеспечивающие минимизацию погрешностей измерений искомых ТФС исследуемых веществ и материалов) значения: а) режимных параметров проведения процесса измерения; б) основных конструкционных размеров измерительного устройства; в) параметров алгоритма обработки экспериментальных данных; г) погрешностей измерения физических величин, непосредственно определяемых в процессе эксперимента по измерению искомых ТФС;

7) сформулировать практические рекомендации по осуществлению как режимных параметров разработанного нового метода измерения ТФС, так и основных (базовых) конструкционных размеров устройства для осуществления этого метода с учетом результатов решения задачи оптимизации; как правило, сформулированные практические рекомендации могут быть использованы в качестве основы при записи формулы изобретения и последующей подачи заявки на изобретение с целью защитить результаты выполненной работы (исследования) патентом [4, 5];

8) следует отметить, что после изготовления опытного образца измерительного устройства и экспериментальной проверки разработанного нового метода измерения ТФС веществ (с использованием эталонных материалов с известными теплофизическими свойствами), в алгоритм для обработки экспериментальных данных, как правило, приходится включать методику введения поправок на систематические погрешности измерений ТФС [6].

Пример применения теоретических основ математической физики, математической метрологии и теории погрешностей при выводе расчетных соотношения для вычисления среднеквадратичных оценок относительных погрешностей измерения ТФС веществ при разработке метода плоского импульсного источника теплоты

Цель работы – рассмотрение примера выработки рекомендаций по выбору наилучших (оптимальных с точки зрения минимизации погрешностей измерения ТФС) режимных параметров метода плоского импульсного источника теплоты

и основного конструкционного размера устройства для его осуществления, а именно [6 – 8]: 1) рекомендуемых условий как сбора данных, так и осуществления процесса обработки данных, полученных в ходе эксперимента; 2) оптимальной длительности теплового импульса, подводимого к плоскому нагревателю; 3) значения толщины средней пластины образца исследуемого материала, обеспечивающего минимизацию погрешности измерений.

Физическая модель измерительного устройства представляет собой ячейку, в которую помещают образец, состоящий из трех пластин – нижней, средней и верхней. Наиболее высокие требования предъявляются к точности изготовления средней пластины толщины x, верхняя и нижняя грани которой должны быть выполнены строго параллельно друг другу. Между нижней и средней пластинами обычно размещают малоинерционный плоский нагреватель, а между средней и верхней – устанавливают датчик температуры, например, термометр сопротивления или термоэлектрический преобразователь (термопару) [1 – 5, 7, 15].

Математическая модель температурного поля в образце исследуемого материала при использовании рассматриваемого метода и устройства. Для рассматриваемого метода плоского импульсного источника теплоты, математическая модель температурного поля $T(x, \tau)$ представляет собой краевую задачу теплопроводности [4, 5]:

$$\frac{\partial T(x,\tau)}{\partial \tau} = a\frac{\partial^2 T(x,\tau)}{\partial x^2}, \quad \tau > 0, \ 0 < x < \infty; \tag{1}$$

$$T(x,0) = T_0 = 0; \tag{2}$$

$$-\lambda\frac{\partial T(0,\tau)}{\partial x} = q(\tau,\tau_и) = q_c[h(\tau) - h(\tau-\tau_и)]; \tag{3}$$

$$T(\infty,\tau) = T_0 = 0, \tag{4}$$

где x, τ – пространственная координата образца и время соответственно; $c\rho$, λ – соответственно объемная теплоемкость и теплопроводность исследуемого материала; T_0 – начальная температура материала (в момент времени $\tau = 0$), принимаемая за начало температурной шкалы в каждом эксперименте, то есть $T_0 = 0$; $\tau_и$ – длительность реального (не мгновенного) теплового импульса, подводимого к нагревателю; $q(\tau,\tau_и)$ – функция, определяющая импульсный плоский источник теплоты; q_c – тепловой поток, подводимый к образцу через поверхность $x = 0$ в течение промежутка времени $0 < \tau \le \tau_и$; $h(\tau)$, $h(\tau-\tau_и)$ – единичные асимметричные ступенчатые функции, задаваемые соотношениями [4, 5, 12]:

$$h(\tau) = \begin{cases} 0 \text{ при } \tau < 0, \\ 1 \text{ при } \tau \ge 0; \end{cases} \qquad h(\tau-\tau_и) = \begin{cases} 0 \text{ при } \tau < \tau_и, \\ 1 \text{ при } \tau \ge \tau_и. \end{cases} \tag{5}$$

Аналитическое решение краевой задачи (1) – (4) имеет вид [7, 19, 20]:

$$T(x,\tau) - T_0 = \frac{2q_c}{\lambda} f(x,\tau,\tau_и,a); \tag{6}$$

где

$$f(x,\tau,\tau_и,a)=\begin{cases}\sqrt{a\tau}\,\mathrm{ierfc}\left(\dfrac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right) & \text{при}\quad 0<\tau\le\tau_и,\\ \sqrt{a\tau}\,\mathrm{ierfc}\left(\dfrac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right)-\sqrt{a(\tau-\tau_и)}\,\mathrm{ierfc}\left(\dfrac{x}{2\sqrt{a(\tau-\tau_и)}}\right) & \text{при}\quad 0>\tau_и,\end{cases}\qquad(7)$$

$\mathrm{ierfc}(u)=\int\limits_u^{\infty}\mathrm{ierfc}(W)dW=\dfrac{1}{\sqrt{\pi}}\mathrm{e}^{-\mathrm{e}^2}-u\,\mathrm{erfc}(u)$ – специальная функция [4, 5, 15, 16], представляющая собой интеграл от функции $\mathrm{erfc}(W)=1-\mathrm{erf}(W)$; $\mathrm{erf}(W)=\dfrac{2}{\sqrt{\pi}}\int\limits_0^W\mathrm{e}^{-W^2}dW$ – функция ошибок Гауса [4, 5, 12, 14 – 16].

Для времени $\tau\ge\tau_и$ решение (6) с учетом (7) принимает вид

$$T(x,\tau)-T_0=\frac{q_c x}{\lambda}\left[\frac{\mathrm{ierfc}[U(\tau)]}{U(\tau)}-\frac{\mathrm{ierfc}[U(\tau-\tau_и)]}{U(\tau-\tau_и)}\right],\qquad(8)$$

где $U(\tau)=\dfrac{x}{2\sqrt{a\tau}}$, $U(\tau-\tau_и)=\dfrac{x}{2\sqrt{a(\tau-\tau_и)}}$ – безразмерные функции x, τ, $\tau_и$, a.

Традиционный подход к проведению эксперимента и последующей обработке полученных данных при измерении ТФС известным методом плоского «мгновенного» источника теплоты состоит из нескольких этапов [1, 2, 7]:

1) изготавливают образец исследуемого материала в виде трех пластин, между которыми размещают плоский нагреватель и термоэлектрический преобразователь, а затем дожидаются достижения равномерного распределения температурного поля $T(x,\tau)=T_0=\mathrm{const}$ внутри исследуемого образца;

2) в течение очень короткого промежутка времени $0<\tau\le\tau_и$ на плоский электронагреватель площадью S подают постоянную мощность P и по сигналу термопары регистрируют изменение разности температур $[T(x,\tau)-T_0]$ во времени τ;

3) по полученным экспериментальным данным определяют максимальное значение разности температур $[T_{max}-T_0]=[T(x,\tau_{max})-T_0]$ и значение момента времени $\tau=\tau_{max}$, соответствующее этому максимальному значению $[T_{max}-T_0]$;

4) по этим значениям τ_{max}, $T_{max}-T_0$ с учетом известных значений расстояния x и суммарного количества теплоты Q_n, подведенного к образцу, вычисляют искомые значения коэффициента температуропроводности a и теплопроводности λ исследуемого материала по известным формулам [1, 15] $a=\dfrac{x^2}{2\tau_{max}}$, $\lambda=\dfrac{Q_n}{T\sqrt{2\pi\tau_{max}}}$.

Для традиционного порядка проведения эксперимента и обработки полученных данных характерны следующие недостатки: 1) высокая относительная погрешность определения момента времени $\tau=\tau_{max}$ (порядка 15 – 20 %), 2) отсутствие рекомендаций по выбору: а) оптимальных условий обработки экспериментальных данных; б) оптимальной толщины x средней пластины образца; в) оптимального значения длительности $\tau_и$ теплового импульса.

Расчетные формулы для вычисления искомых ТФС по экспериментальным данным. Методика обработки экспериментальных данных, предложенная в [4, 5], базируется на использовании безразмерного параметра

$$\gamma = \frac{T(x,\tau) - T_0}{T(x,\tau_{\max} - T_0)}, \tag{9}$$

представляющего отношение текущего значения разности температур $[T(x,\tau) - T_0]$ к ее максимальному значению $[T_{\max} - T_0] = [T(x,\tau_{\max}) - T_0]$ в момент времени $\tau = \tau_{\max}$, каждой величине которого, а следовательно, каждому значению γ, на интервале $0 < \tau < \tau_к$ (где $\tau_к$ – момент окончания эксперимента) соответствует конкретный момент времени τ' и значение безразмерной функции $U(\tau') = \frac{x}{2\sqrt{a\tau'}}$.

По данным, полученным в процессе экспериментального измерения ТФС (в виде массива разностей температур $[T(x,\tau) - T_0]$, соответствующих известным моментам времени τ), в процессе обработки необходимо определить величину безразмерной функции $U(\tau') = \frac{x}{2\sqrt{a\tau'}}$, соответствующую заданному значению безразмерного параметра γ. Для этого в [4, 5] предложен следующий подход. Если в формулу (8) подставить значение $\tau = \tau_{\max}$, то получаем

$$T_{\max} - T_0 = T(x,\tau_{\max}) - T_0 = \frac{q_c x}{\lambda}\left[\frac{\mathrm{ierfc}[U(\tau_{\max})]}{U(\tau_{\max})} - \frac{\mathrm{ierfc}[U(\tau_{\max} - \tau_и)]}{U(\tau_{\max} - \tau_и)}\right], \tag{8a}$$

а после деления (8) на (8а) соотношение (9) приобретает вид

$$\gamma = \frac{T(x,\tau) - T_0}{T_{\max} - T_0} = \frac{\dfrac{\mathrm{ierfc}[U(\tau)]}{U(\tau)} - \dfrac{\mathrm{ierfc}[U(\tau - \tau_и)]}{U(\tau - \tau_и)}}{\dfrac{\mathrm{ierfc}[U(\tau_{\max})]}{U(\tau_{\max})} - \dfrac{\mathrm{ierfc}[U(\tau_{\max} - \tau_и)]}{U(\tau_{\max} - \tau_и)}}. \tag{9a}$$

В ходе выполненного исследования, при численном моделировании процесса измерений определяли массив разностей температур $[T(x,\tau) - T_0]$, а затем, методом перебора, находили максимальное значение $T_{\max} - T_0$, аналитическое выражение для которого получается из (8) при $\tau = \tau_{\max}$ в виде (8а). При известном $T_{\max} - T_0$ и заданном γ из уравнения (9а) находили его корень в виде значения безразмерной функции $U(\tau')$. По найденному значению безразмерной функции $U(\tau')$ (при известных соответствующих значениях x и τ'), на основе соотношения $U(\tau') = \frac{x}{2\sqrt{a\tau'}}$ искомое значение коэффициента температуропроводности вычисляли по формуле

$$a = \frac{x^2}{4\tau'(U(\tau'))^2}. \tag{10}$$

С учетом (8) и (9), формула для вычисления теплопроводности приобретает вид

$$\lambda = \Phi[U(\tau'),\ \tau_и,\ \tau'] \frac{q_c x}{[T(x,\tau') - T_0]}, \tag{11}$$

где $\Phi[U(\tau'),\ \tau_и,\ \tau'] = \dfrac{\mathrm{ierfc}[U(\tau')]}{U(\tau')} - \dfrac{\mathrm{ierfc}\left[U(\tau')\sqrt{\dfrac{\tau'}{\tau'-\tau_и}}\right]}{U(\tau')\sqrt{\dfrac{\tau'}{\tau'-\tau_и}}}$.

Математическая модель среднеквадратичной оценки относительных погрешностей $(\delta a)_{ск}$ *измерения коэффициента температуропроводности.* Согласно теории погрешностей [1, 7, 13], после логарифмирования зависимости (10), определения дифференциала от левой и правой частей и последующего выполнения действий по рекомендациям [1 – 5, 7], получено соотношение

$$(\delta a)_{ск} = \sqrt{4(\delta x)^2 + \left[\frac{\Delta T}{\tau'\left\{\dfrac{d\left[T(x,\tau)-T_0\right]}{d\tau'}\right\}}\right]^2 + \left[\frac{1}{U'}\frac{dU'}{d\gamma}\sqrt{\gamma^2+1}\,\delta(T_{\max}-T_0)\right]^2}, \quad (12)$$

применяемое в дальнейшем при осуществлении расчетов в целях определения (для случая измерения коэффициента температуропроводности) оптимальных значений: 1) безразмерного параметра γ; 2) основного конструкционного размера x средней пластины исследуемого образца.

Математическая модель среднеквадратичной оценки относительной погрешности $(\delta\lambda)_{ск}$ *измерения теплопроводности* λ**.** С учетом того, что при каждой известной длительности $\tau_и$ теплового импульса значения момента времени $\tau' = \tau'(\gamma)$ и безразмерной функции $U(\tau'(\gamma)) = U'(\gamma)$ зависят от безразмерного параметра γ, ранее полученная формула (11) для вычисления теплопроводности λ преобразована к виду [4, 5]

$$\lambda = \frac{q_c x}{\left[T(x,\tau(\gamma)) - T_0\right]} F(\gamma), \quad (13)$$

где $F(\gamma) \equiv \Phi[U(\tau'(\gamma)), U(\tau'(\gamma) - \tau_и)]$.

Согласно рекомендациям теории погрешностей [1, 7, 13], после логарифмирования зависимости (13), определения дифференциалов от левой и правой частей и последующего выполнения действий по рекомендациям, детально изложенным в [1 – 5, 7, 13]), в работах [4, 5] получено соотношение для вычисления среднеквадратичной оценке $(\delta\lambda)_{ск}$ относительной погрешности определения теплопроводности, имеющее вид

$$(\delta\lambda)_{ск} = \sqrt{(\delta q_c)^2 + (\delta x)^2 + \left\{\frac{1}{F(\gamma)}\frac{\partial F(\gamma)}{\partial\gamma} + \sqrt{1+\gamma^2}\,\delta(T_{\max}-T_0)\right\}^2 + \left(\frac{\Delta T}{T(x,\tau)-T_0}\right)^2}. \quad (14)$$

Выбор оптимального значения длительности $\tau_и$ *теплового импульса, подводимого к плоскому нагревателю.* В процессе работы стало очевидно, что относительные среднеквадратичные погрешности $(\delta a)_{ск}$ измерения коэффициента температуропроводности a и $(\delta\lambda)_{ск}$ измерения теплопроводности λ зависят также от длительности $\tau_и$ теплового импульса. Для снижения погрешностей измерения теплопроводности $(\delta\lambda)_{ск}$ при проведении измерений надо обеспечить такие режи-

мы выполнения экспериментов, при которых максимальная разность температур в образце менялась бы не очень сильно, то есть $[T_{\max} - T_0] \approx \text{const}$. Для этого к единице поверхности (1 м^2) образца в каждом эксперименте следует подводить примерно постоянное количество теплоты, Дж/м^2, $Q_{\text{п}} = 2q_c\tau_{\text{и}} = \text{const}$. Тогда потребляемую нагревателем мощность, обеспечивающую выполнение условия $Q_{\text{п}} \approx \text{const}$, можно рассчитать по формуле $P = Q_{\text{п}}S/\tau_{\text{и}}$. При этом тепловой поток (от нагревателя, имеющего мощность P и площадь S), подводимый к нижней стороне средней пластины в течение промежутка времени $0 \le \tau \le \tau_{\text{и}}$, можно вычислить по формуле [4, 5]

$$q_c = \frac{P}{2S}. \tag{15}$$

Экспериментальные исследования показали следующее. При использовании образцов теплоизоляционных материалов (с толщиной средней пластины 2,5…5,0 мм, коэффициентом температуропроводности $a = (1\ldots1{,}5)\ 10^{-7}$ м^2/с и теплопроводностью $\lambda = 0{,}05\ldots0{,}2$ Вт/(м·К), для получения разности температур в диапазоне 3…7 °С подводимое к единице поверхности количество теплоты должно быть в диапазоне значений $Q_{\text{п}} \approx 50\ldots80$ кДж/м^2. При значениях величины $Q_{\text{п}} = 55$ кДж/м^2 и площади нагревателя $S = 0{,}01$ м^2, потребляемую нагревателем мощность можно вычислить по формуле

$$P = \frac{550}{\tau_{\text{и}}}. \tag{16}$$

После логарифмирования выражения (15), определения дифференциалов от его левой и правой частей, а также выполнения рекомендаций теории погрешностей [1, 10, 17], получаем

$$\delta q_c = \sqrt{(\delta P)^2 + (\delta S)^2} = \sqrt{\left(\frac{\Delta P}{P(\tau_{\text{и}})}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S}{S}\right)^2}. \tag{17}$$

После подстановки (17) в (14) при вычислении $P(\tau_{\text{и}})$ по формуле (16), получаем

$$(\delta\lambda)_{\text{ск}} = \sqrt{\left[\frac{\Delta P}{P(\tau_{\text{и}})}\right]^2 + (\delta S)^2 + (\delta x)^2 + \left(\gamma^2 + 1\right)\left(\frac{\partial F(\gamma)}{F(\gamma)\partial\gamma}\delta(T_{\max} - T_0)\right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{(T(x,\tau) - T_0)}\right)^2}. \tag{18}$$

Результаты численного моделирования среднеквадратичных оценок относительных погрешностей измерения коэффициента температуропроводности a и теплопроводности λ. Из полученных формул (12) и (18) рассчитаны зависимости среднеквадратичных относительных погрешностей $(\delta a)_{\text{ск}}$, $(\delta\lambda)_{\text{ск}}$ при длительности теплового импульса $\tau_{\text{и}} = 21$ с (рис. 1). При этом использованы исходные данные: $\delta S = 0{,}5$ %, $Q_{\text{п}} = 55$ кДж/м^2, $5\ \text{с} < \tau_{\text{и}} < 40$ с, $a = 1{,}06\cdot10^{-7}$ м^2/с, $\lambda = 0{,}194$ Вт/(м·К), $\Delta P = 0{,}5$ Вт, $x = (2\ldots8)$ мм, $\Delta x = 0{,}1$ мм, $\Delta T = 0{,}05$ К.

В процессе работы выяснилось, что минимальные значения относительных погрешностей $(\delta a)_{\text{ск}}$, $(\delta\lambda)_{\text{ск}}$ зависят не только от величины безразмерного параметра γ, но и от значения расстояния x от плоскости размещения нагревателя до плоскости установки термопары, измеряющей разность температур $[T(x,\tau') - T_0]$. Поэтому принято решение построить (на плоскости с координатами γ и x) линии равных уровней погрешностей (рис. 2).

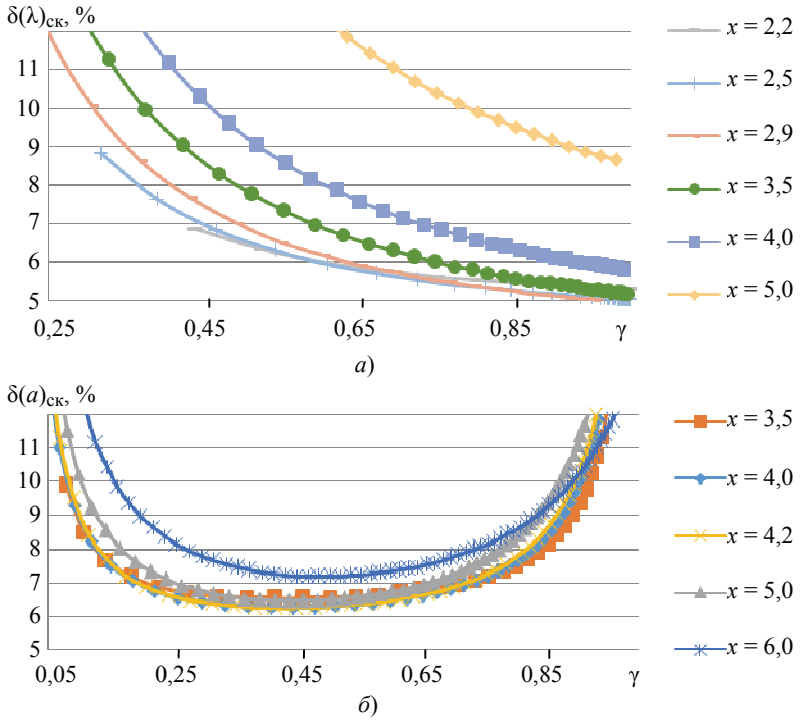


Рис. 1. Зависимости среднеквадратичных относительных погрешностей $(\delta\lambda)_{ск}$ и $(\delta a)_{ск}$ (от безразмерного параметра γ) при различных значениях расстояния *x* от места действия плоского импульсного источника теплоты до плоскости, в которой размещена термопара, измеряющая разность температур $[T(x,\tau')-T_0]$ при экспериментальном определении:

а – теплопроводности λ; *б* – коэффициента температуропроводности *a*

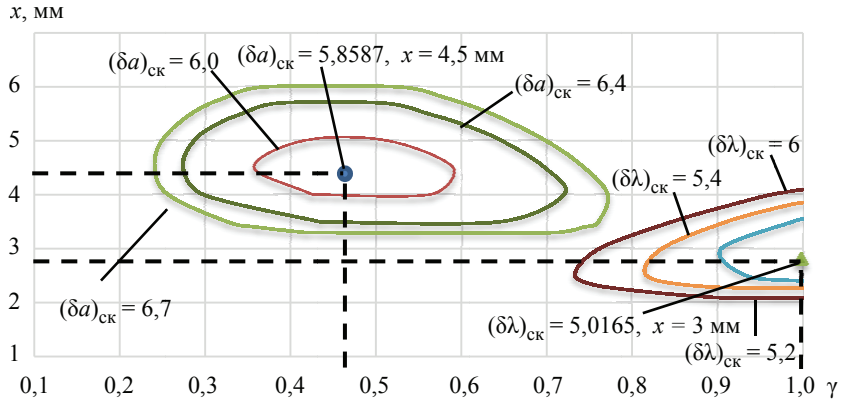


Рис. 2. Линии равных уровней среднеквадратичных относительных погрешностей $(\delta a)_{ск}$ и $(\delta\lambda)_{ск}$, построенные при оптимальной длительности $\tau_и$ теплового импульса 21 с

Результаты вычислений показывают, что (при использованных в расчетах исходных данных) приемлемые значения среднеквадратичных относительных погрешностей $(\delta a)_{ск}$ измерения коэффициента температуропроводности *a* имеют

место при значениях безразмерного параметра в диапазоне $0{,}35 < \gamma^a \le 0{,}59$ и значениях основного конструкционного размера измерительного устройства в пределах, мм, $4{,}0 < x \le 5{,}0$. При этом минимальные значения погрешности $(\delta a)_{\text{ск}}$ достигаются при $\gamma^a_{\text{опт}} \approx 0{,}465$ и $x^a_{\text{опт}} \approx 4{,}5$ мм.

В то же время, приемлемые значения среднеквадратичных относительных погрешностей $(\delta\lambda)_{\text{ск}}$ измерения теплопроводности λ имеют место в диапазоне значений $0{,}90 < \gamma \le 1{,}0$ и $2{,}4 < x \le 3{,}6$. При этом минимальные значения погрешностей $(\delta\lambda)_{\text{ск}}$ достигаются при $\gamma^\lambda_{\text{опт}} \approx 1$ и $x^\lambda_{\text{опт}} \approx 3{,}0$ мм.

Таким образом для достижения минимальных значений погрешности $(\delta a)_{\text{ск}}$ и $(\delta\lambda)_{\text{ск}}$ при измерении коэффициента температуропроводности a и теплопроводности λ исследуемого материала, следует использовать измерительный преобразователь с расстоянием между измерителем температуры и нагревателем в диапазоне, мм, 3,0 < x < 4,5, причем можно принять $x_{\text{опт}} = \dfrac{x^a_{\text{опт}} + x^\lambda_{\text{опт}}}{2} = 3{,}75$ мм.

Для уточнения оптимального значения длительности $\tau_{\text{и}}$ теплового импульса, обеспечивающего достижение минимальных значений относительных погрешностей $(\delta a)_{\text{ск}}$, $(\delta\lambda)_{\text{ск}}$ и среднеарифметических значений погрешностей $\delta_{\text{ср}} = \dfrac{\left[(\delta a)_{\text{ск}} + (\delta\lambda)_{\text{ск}}\right]}{2}$ измерения ТФС a и λ, выполнены расчеты по формулам (12) и (18) (при уже ранее определенных оптимальных значениях $\gamma^a_{\text{опт}} = 0{,}465$; $\gamma^\lambda_{\text{опт}} = 1$; $x_{\text{опт}} = 3{,}75$ мм) (рис. 3). Очевидно, что при изменении длительности $\tau_{\text{и}}$ теплового импульса, среднеарифметическое значение среднеквадратичных оценок относительных погрешностей принимает минимальные значения при $\tau^{\text{опт}}_{\text{и}} \approx 21$ с, находящемся в диапазоне 18 < $\tau_{\text{и}}$ < 24.

Из приведенной зависимости может сложиться неправильное впечатление, что при учете влияния длительности $\tau_{\text{и}}$ теплового импульса снижение погрешностей измерений происходит всего на 0,025 – 0,063 % (см. рис. 3). Применение предложенных в работах [6 – 8] метода измерения и методики обработки данных позволяет величину среднеарифметического значения среднеквадратичных оценок относительных погрешностей

$$\delta_{\text{ср}} = \frac{\left[(\delta a)_{\text{ск}} + (\delta\lambda)_{\text{ск}}\right]}{2} \tag{19}$$

снизить на 5 – 8 % по сравнению с традиционным методом плоского «мгновенного» источника теплоты [1, 2, 10, 19].

Для иллюстрации данного факта выполнены расчеты значений коэффициента температуропроводности a и теплопроводности λ при различных значениях длительности $\tau_{\text{и}}$ теплового импульса с применением:

– предложенных в работах [4, 5] расчетных соотношений (10) и (11);

– расчетных соотношений [1, 2, 7, 15]:

$$a_{\text{мгн}} = \frac{x^2}{2\tau_{\max}}; \qquad \lambda_{\text{мгн}} = \frac{Q_n x_0}{2\sqrt{2\pi e \tau_{\max} T_{\max}}}, \tag{20}$$

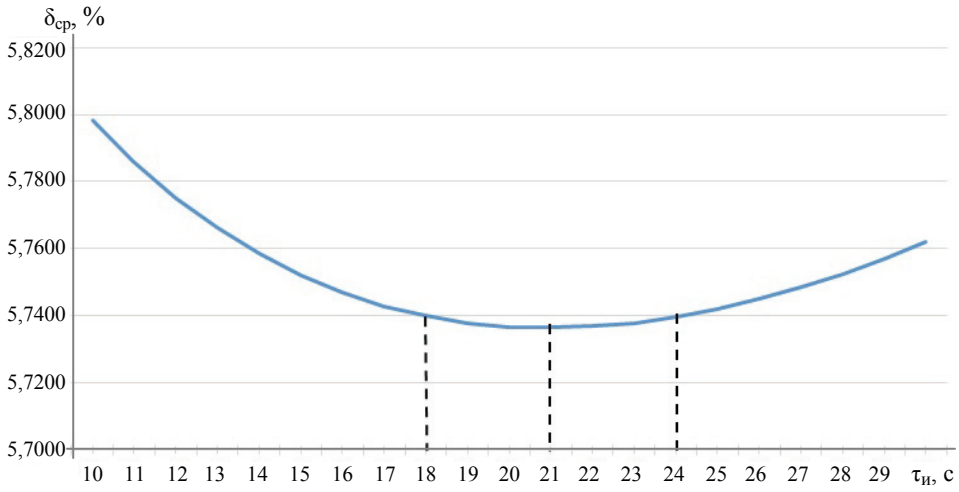


Рис. 3. Зависимости среднеарифметических значений (19) среднеквадратичных оценок относительных погрешностей $(\delta a)_{ск}$ и $(\delta\lambda)_{ск}$ измерения коэффициента температуропроводности *a* и теплопроводности λ от длительности $\tau_и$ теплового импульса при обработке данных методом плоского импульсного источника теплоты [6 – 8]

используемых при осуществлении традиционного метода плоского «мгновенного» источника теплоты. В этих расчетах использованы точные значения $a_т = 1{,}06 \cdot 10^{-7}$ м²/с; $\lambda_т = 0{,}194$ Вт/(м·К); $x_{опт} = 3{,}75$ мм, а величину мощности вычисляли по формуле (16).

После вычисления значений a и λ по формулам (10) и (11), а также $a_{мгн}$ и $\lambda_{мгн}$ по формулам (20), рассчитывали погрешности $\delta a = \dfrac{a - a_т}{a_т} 100\,\%$, $\delta\lambda = \dfrac{\lambda - \lambda_т}{\lambda_т} 100\,\%$, $\delta a_{мгн} = \dfrac{a_{мгн} - a_т}{a_т} 100\,\%$, $\delta\lambda_{мгн} = \dfrac{\lambda_{мгн} - \lambda_т}{\lambda_т} 100\,\%$, а затем среднеарифметические значения $\bar{\delta} = \dfrac{[\delta a + \delta\lambda]}{2}$ и $\bar{\delta}_{мгн} = \dfrac{[\delta a_{мгн} + \delta\lambda_{мгн}]}{2}$.

В результате получены графики $\bar{\delta} = f_1(\tau_и)$ и $\bar{\delta}_{мгн} = f_2(\tau_и)$ (рис. 4). Из приведенных графиков видно, что при численном моделировании измерения теплофизических свойств получены следующие результаты:

1) при использовании предлагаемого в работах [4, 5] метода плоского импульсного источника теплоты среднеарифметические значения погрешностей $\bar{\delta} = f_1(\tau_и)$ обработки данных не превышают 1 %;

2) при обработке данных с применением расчетных соотношений (20), лежащих в основе традиционного метода плоского «мгновенного» источника теплоты [1, 2, 7, 15], среднеарифметические значения погрешностей обработки данных $\bar{\delta}_{мгн} = \dfrac{[\delta a_{мгн} + \delta\lambda_{мгн}]}{2} = f_2(\tau_и)$ достигают величин 5 – 8 % при длительности теплового импульса в диапазоне $17 < \tau_и < 30$.

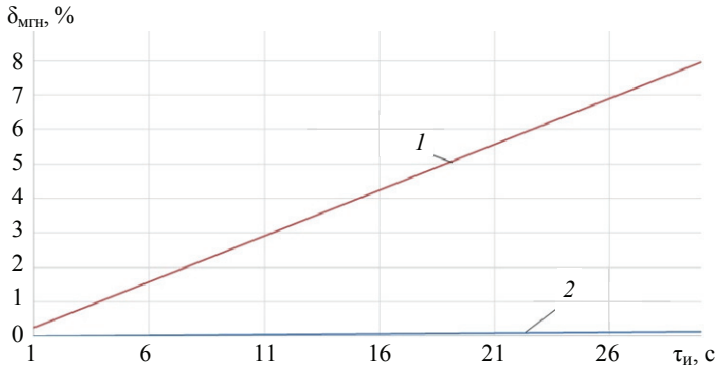


Рис. 4. Сравнение погрешностей обработки экспериментальных данных:
1 – $\bar{\delta}_{мгн} = f_2(\tau_и)$ – традиционным методом плоского «мгновенного» источника теплоты; *2* – $\bar{\delta} = f_1(\tau_и)$ – методом плоского импульсного источника теплоты [4 – 7]

Заключение

Рекомендации по осуществлению метода плоского импульсного источника теплоты, предложенного в [5, 7]. При измерении теплофизических свойств исследуемого материала, значения коэффициентов температуропроводности *a* и теплопроводность λ которого отличаются от использованных в данной статье (в исходных данных рассмотренных выше расчетов), следует поступить следующим образом:

1) путем проведения предварительных измерений следует экспериментально определить ориентировочные значения коэффициента температуропроводности $a_{ор}$ и теплопроводности $\lambda_{ор}$ исследуемого материала;

2) действуя по аналогии с представленной методикой, необходимо осуществить расчеты (при найденных значениях $a_{ор}$ и $\lambda_{ор}$) в целях определения (уточнения) оптимальных значений параметра $\gamma_{опт}$ и конструкционных размеров $x^{a}_{опт}$ и $x^{\lambda}_{опт}$ средней пластины, применяемой для измерения коэффициента температуропроводности *a* и теплопроводности λ;

3) изготовить образцы с двумя средними пластинами с толщиной $x^{a}_{опт}$ и $x^{\lambda}_{опт}$, либо с одной средней пластиной с толщиной $x_{опт} = \left(x^{a}_{опт} + x^{\lambda}_{опт}\right)/2$;

4) путем проведения серии экспериментов (с изготовленными образцами) осуществить измерения и последующую обработку полученных данных и, в результате, получить значения искомых коэффициента температуропроводности *a* и теплопроводности λ исследуемого материала.

Список литературы

1. Теоретические и практические основы теплофизических измерений : монография / С. В. Пономарев, С. В. Мищенко, А. Г. Дивин [и др.] ; под ред. С. В. Пономарева. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 408 с.

2. Гуров, А. В. Измерение теплофизических свойств теплоизоляционных материалов методом плоского «мгновенного» источника теплоты : монография / А. В. Гуров, С. В. Пономарев ; под ред. С. В. Пономарева. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013. – 100 с.

3. The Choice of the Optimum Conditions for Measuring the Thermal Properties of Materials by the Plane «Instantaneous» Heat Source Method / A. V. Gurov, G. A. Sosedov, A. E. Rodina, S. V. Ponomarev // Measurement Techniques. – 2012. – Vol. 55, No. 10. – P. 1187 – 1192. doi: 10.1007/s11018-012-0106-9

4. Минимизация погрешностей измерений коэффициентов теплопроводности и температуропроводности теплоизоляционных материалов методом плоского импульсного источника теплоты / С. В. Пономарев, Е. В. Буланов, В. О. Буланова, А. Г. Дивин // Измерительная техника. – 2018. – № 12. – С. 43 – 46. doi: 10.32446/0368-1025it.2018-12-43-46

5. Буланов, Е. В. Повышение точности измерения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов с применением метода плоского импульсного источника теплоты : дис. … канд. техн. наук : 05.11.13 / Буланов Евгений Владимирович. – Тамбов, 2019. – 122 с.

6. Рекомендации по разработке методики введения поправок на систематические погрешности измерения теплофизических свойств веществ / С. В. Пономарев, А. Г. Дивин, П. В. Балабанов [и др.] // Метрология. – 2013. – № 10. – С. 38 – 47.

7. Пономарев, С. В. Применение математических основ метрологии при оптимизации режимных параметров методов и основных конструкционных размеров устройств для измерения теплофизических свойств веществ : монография / С. В. Пономарев, А. Г. Дивин, Д. А. Любимова ; под ред. С. В. Пономарева. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015. – 160 с.

8. Пономарев, С. В. Методы и устройства для измерения эффективных теплофизических характеристик потоков технологических жидкостей / С. В. Пономарев, С. В. Мищенко. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 1997. – 248 с.

9. Ponomarev, S. V. Measurements of Thermophysical Properties by Laminar Flow Methods / S. V. Ponomarev, S. V. Mishchenko, T. F. Irvine. – New-York : Begell House Inc., 2001. – 278 p.

10. Чуриков, А. А. Методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств изделий и образцов из неоднородных твердых материалов : дис. ... д-ра техн. наук : 05.11.13 / Чуриков Александр Алексеевич. – Тамбов, 2000. – 641 с.

11. Власов, В. В. Теплофизические измерения. Справочное пособие по методам расчета полей, характеристик тепломассопереноса и автоматизации измерений / В. В. Власов, Ю. С. Шаталов, С. В. Пономарев [и др.]. – Тамбов : Изд-во ВНИИРТмаш, 1975. – 256 с.

12. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Определения. Теоремы. Формулы / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1973. – 832 с.

13. Зайдель, А. Н. Ошибки измерений физических величин / А. Н. Зайдель. – Л. : Наука, 1974. – 108 с.

14. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М. : Высш. школа, 1967. – 600 с.

15. Методы определения теплопроводности и температуропроводности / А. Г. Шашков, Г. М. Волохов, Т. Н. Абраменко, В. П. Козлов ; под ред. А. В. Лыкова. – М. : Энергия, 1973. – 336 с.

16. Карслоу, Г. С. Теплопроводность твердых тел : пер. со 2-го англ. изд. / Г. С. Карслоу, Д. Егер ; под ред. А. А. Померанцева. – М. : Наука, 1964. – 489 с.

Methodology for Obtaining the Objective Function and Solving the Problems of Optimization of Methods and Devices for Measuring Thermophysical Properties of Substances Using the Example of the Method of a Plane Pulsed Heat Source

S. V. Ponomarev, V. O. Bulanova, E. V. Bulanov

Department of Mechatronics and Technological Measurements, svponom@yahoo.com; TSTU (1); JSC Tambov Plant Oktyabr (2); LLC RASK (3), Tambov, Russia

Keywords: measurement; construction size; thermal diffusivity; method; data processing; optimization; errors; flat thermal impulse; regime parameters; thermal conductivity.

Abstract: The paper presents guidelines on the application of the theory of thermal conductivity, methods of mathematical metrology and the theory of errors to obtain a record of the objective function, formulation and subsequent solution of the problem of optimizing methods and devices for measuring the thermophysical properties of substances. An example of the application of these recommendations in the development of the method of a flat pulsed heat source for monitoring the thermophysical properties of solid materials is given.

References

1. Ponomarev S.V. [Ed.], Mishchenko S.V., Divin A.G., Vertrogradskiy V.A., Churikov A.A. *Teoreticheskiye i prakticheskiye osnovy teplofizicheskikh izmereniy: monografiya* [Theoretical and practical foundations of thermophysical measurements: monograph], Moscow: FIZMATLIT, 2008, 408 p. (In Russ.)

2. Gurov A.V., Ponomarev S.V. [Ed.] *Izmereniye teplofizicheskikh svoystv teploizolyatsionnykh materialov metodom ploskogo «mgnovennogo» istochnika teploty: monografiya* [Measurement of the thermophysical properties of heat-insulating materials by the method of a flat "instantaneous" heat source: monograph], Tambov: Izdatel'stvo FGBOU VPO «TGTU», 2013, 100 p. (In Russ.)

3. Gurov A.V., Sosedov G.A., Rodina A.E., Ponomarev S.V. The Choice of the Optimum Conditions for Measuring the Thermal Properties of Materials by the Plane «Instantaneous» Heat Source Method, *Measurement Techniques*, 2012, vol. 55, no. 10, pp. 1187-1192, doi: 10.1007/s11018-012-0106-9

4. Ponomarev S.V., Bulanov Ye.V., Bulanova V.O., Divin A.G. [Minimization of measurement errors of thermal conductivity coefficients and thermal diffusivity of heat-insulating materials by the method of a flat pulsed heat source], *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring equipment], 2018, no. 12, pp. 43-46, doi: 10.32446/0368-1025it.2018-12-43-46 (In Russ., abstract in Eng.)

5. Bulanov Ye.V. *PhD Dissertation* (*Technical*), Tambov, 2019, 122 p. (In Russ.)

6. Ponomarev S.V., Divin A.G., Balabanov P.V. [et al.] [Recommendations for developing a methodology for introducing corrections for systematic errors in measuring the thermophysical properties of substances], *Metrologiya* [Metrology], 2013, no. 10, pp. 38-47. (In Russ.)

7. Ponomarev S.V. [Ed.], Divin A.G., Lyubimova D.A. *Primeneniye matematicheskikh osnov metrologii pri optimizatsii rezhimnykh parametrov metodov i osnovnykh konstruktsionnykh razmerov ustroystv dlya izmereniya teplofizicheskikh svoystv veshchestv: monografiya* [Application of the mathematical foundations of metrology in optimizing the regime parameters of methods and the main structural dimensions of devices for measuring the thermophysical properties of substances: monograph], Tambov: Izdatel'stvo FGBOU VPO «TGTU», 2015, 160 p. (In Russ.)

8. Ponomarev S.V., Mishchenko S.V. *Metody i ustroystva dlya izmereniya effektivnykh teplofizicheskikh kharakteristik potokov tekhnologicheskikh zhidkostey* [Methods and devices for measuring the effective thermophysical characteristics of technological liquid flows], Tambov: Izdatel'stvo Tamb. gos. tekhn. un-ta, 1997, 248 p. (In Russ.)

9. Ponomarev S.V., Mishchenko S.V., Irvine T.F. *Measurements of Thermophysical Properties by Laminar Flow Methods*, New-York: Begell House Inc., 2001, 278 p.

10. Churikov A.A. *PhD Dissertation* (*Technical*), Tambov, 2000, 641 p. (In Russ.)

11. Vlasov V.V., Shatalov Yu.S., Ponomarev S.V. [et al.] *Teplofizicheskiye izmereniya. Spravochnoye posobiye po metodam rascheta poley, kharakteristik teplomassoperenosa i avtomatizatsii izmereniy* [Thermophysical measurements.

Reference manual on methods of calculating fields, characteristics of heat and mass transfer and automation of measurements], Tambov: Izdatel'stvo VNIIRTmash, 1975, 256 p. (In Russ.)

12. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov. Opredeleniya. Teoremy. Formuly* [Handbook of mathematics for scientists and engineers. Definitions. Theorems. Formulas], Moscow: Nauka, 1973, 832 p. (In Russ.)

13. Zaydel' A.N. *Oshibki izmereniy fizicheskikh velichin* [Measurement errors of physical quantities], Leningrad: Nauka, 1974, 108 p. (In Russ.)

14. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of thermal conductivity], Moscow: Vysshaya shkola, 1967, 600 p. (In Russ.)

15. Shashkov A.G., Volokhov G.M., Abramenko T.N., Kozlov V.P., Lykov A.V. [Ed.] *Metody opredeleniya teploprovodnosti i temperaturoprovodnosti* [Methods for determining thermal conductivity and thermal diffusivity], Moscow: Energiya, 1973, 336 p. (In Russ.)

16. Karslou G.S., Yeger D., Pomerantsev A.A. [Ed.] *Teploprovodnost' tverdykh tel* [Thermal conductivity of solids], Moscow: Nauka, 1964, 489 p. (In Russ.)

Methodik zur Erhaltung der Zielfunktion und Lösung der Optimierungsprobleme bei Methoden und Geräten zur Messung der thermophysikalischen Eigenschaften von Stoffen am Beispiel des Verfahrens einer flachen Pulswärmequelle

Zusammenfassung: Es sind die methodischen Empfehlungen für die Anwendung der Wärmeleitungstheorie, der Methoden der mathematischen Messtechnik und der Fehlertheorie betrachtet, um eine Aufzeichnung der Zielfunktion, die Festlegung und die anschließende Neuerstellung des Optimierungsproblems für Methoden und Geräte zur Messung der thermischen Eigenschaften von Substanzen zu erhalten. Ein Beispiel für die Anwendung dieser Empfehlungen bei der Entwicklung des Verfahrens einer flachen Pulswärmequelle zur Überwachung der thermophysikalischen Eigenschaften fester Materialien ist gegeben.

Méthodologie d'obtention de la fonction cible et de la résolution des problèmes d'optimisation des méthodes et des dispositifs pour la mesure des propriétés thermophysiques des matières à l'aide de la méthode de la source de chaleur pulsée plate

Résumé: Sont examinées les recommandations méthodologiques pour l'application de la théorie de la conductivité thermique, des méthodes de métrologie mathématique et de la théorie des erreurs pour l'enregistrement de la fonction cible, la formulation et la résolution ultérieure du problème d'optimisation des méthodes et des dispositifs pour mesurer les propriétés thermiques et physiques des substances. Est donné un exemple de l'application de ces recommandations lors de l'élaboration d'une méthode de source de chaleur pulsée plate pour contrôler les propriétés thermiques des matériaux solides.

Авторы: ***Пономарев Сергей Васильевич*** – доктор технических наук, профессор кафедры «Мехатроника и технологические измерения», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов; ***Буланова Валентина Олеговна*** – кандидат технических наук, ведущий инженер, АО «Тамбовский завод «Октябрь», Тамбов; ***Буланов Евгений Владимирович*** – кандидат технических наук, начальник отдела капитального строительства, ООО «РАСК», Тамбов, Россия.

УДК 004.932
DOI: 10.17277/vestnik.2022.04.pp.573-585

АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ В АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

А. Д. Обухов, К. И. Патутин, А. О. Назарова

Кафедра «Системы автоматизированной поддержки принятия решений», obuhov.art@gmail.com; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия

Ключевые слова: алгоритмы обработки информации; компьютерное зрение; машинное обучение; преобразование изображений.

Аннотация: Изложены основные алгоритмы обработки графической информации, используемые для организации процесса управлении на основе технологий компьютерного зрения. Исходные данные в большинстве случаев требуют предварительной обработки, включая снижение их размерности, выделение ключевых признаков, преобразование, восстановление и повышение качества. Рассмотрены основные классы задач в этой предметной области и алгоритмы их решения, включающие как математическое преобразование изображений, так и применение технологий машинного обучения и компьютерного зрения в автоматических системах управления.

Введение

В настоящее время технологии компьютерного зрения широко применяются в различных областях человеческой деятельности. Если человеческое зрение лучше всего подходит для качественной интерпретации сложных и расплывчатых кадров, то машинное зрение более целесообразно использовать при количественном определении характеристик упорядоченных кадров благодаря таким его особенностям, как скорость, точность и воспроизводимость. Однако эффективность работы напрямую зависит от формы представления данных, содержания, качества исходной графической информации.

Методы предварительной обработки позволяют существенно улучшить входные данные и упростить процесс анализа и последующей организации процесса управления, основанного на технологиях компьютерного зрения. Предварительная обработка данных является первым и неотъемлемым этапом организации процесса управления на основе компьютерного зрения, поскольку качество данных и полезная информация, которая может быть получена из изображений, напрямую влияют на эффективность реализуемой системы управления и используемых алгоритмов.

Главная цель предварительной обработки информации – создание условий, которые в дальнейшем повысят эффективность и качество анализа изображения. Выбор того или иного метода предобработки зависит от специфики используемых данных. На этом этапе могут решаться как относительно простые задачи (фильтрация от шумов, выделение контуров, сегментация, коррекция яркости и контрастности), так и более сложные в реализации (генерация изображений, кодирование, поиск и сегментация объектов).

Классификация основных типов задач при обработке информации в области компьютерного зрения

В рамках данного исследования выделим четыре основных направления обработки информации (рис. 1). Все задачи напрямую связаны с областью компьютерного зрения и решаются в процессе организации программно-аппаратных систем на основе данной технологии.

Сжатие. Исходная графическая информация представляет относительно большой объем данных (размерность равна количество каналов×ширина×длина изображения). Поэтому актуальным направлением является уменьшение размерности за счет применения различных алгоритмов: изменение размера, выделение, удаление цветовых каналов (перевод в оттенки серого или черно-белую цветовую палитру), сжатие при помощи нейронных сетей автоэнкодеров или вейвлет-преобразований, сохраняющих ключевые признаки изображений.

Поиск. Алгоритмы компьютерного зрения и машинного обучения используются для решения задач сегментирования, обнаружения объектов и их классификации, трекинга, поиска ключевых точек объектов.

Восстановление. К данному классу задач относится повышение качества исходных изображений за счет увеличения динамического диапазона и резкости, увеличения разрешения кадра; восстановление поврежденных участков (дорисовка изображения); удаления шумов и артефактов (капель, грязи, тумана и т.д.)

Преобразование. Включает применение различных эффектов, изменение цветовых схем, а также создание на основе исходных кадров новых изображений с добавлением стилевых эффектов. Кроме того, к этому классу можно отнести генерацию следующего кадра на основе предыдущих с использованием рекуррентных и сверточных нейронных сетей.

Для перечисленных задач обработки графических данных проведен сравнительный анализ, на основе которого сформулированы характерные особенности каждой задачи (табл. 1). Под X в данной таблице понимается исходная графическая информация, Y – выходные данные. Знак «+» в i-м столбце обозначает, что данное свойство выполняется для i-й задачи, а знак «–» – что указанное свойство в i-й категории задач отсутствует либо не выполняется.

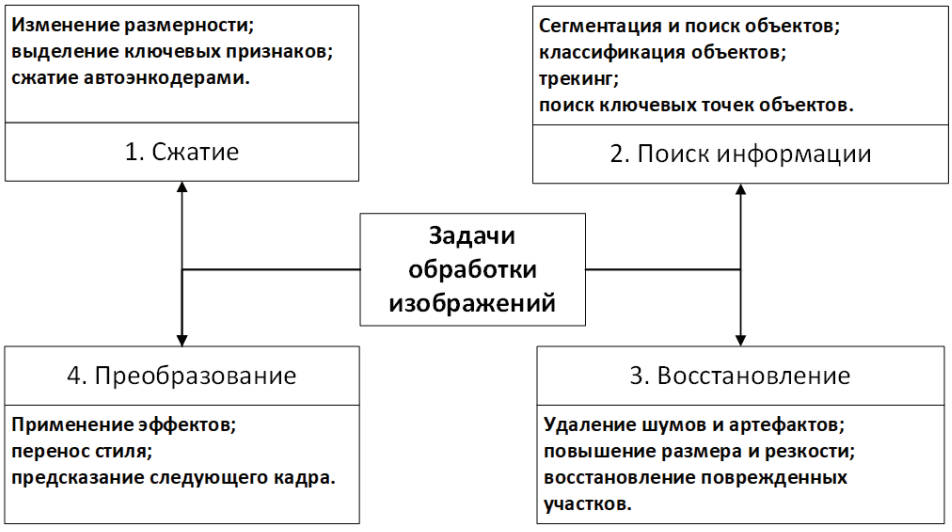


Рис. 1. Классификация задач обработки информации

Таблица 1

Сравнение задач генерации данных в области компьютерного зрения

Задача / Свойство	$\|Y\| > \|X\|$	$\|Y\| < \|X\|$	$\|Y\| = \|X\|$	Y задан
1. Сжатие	–	+	–	–
2. Поиск	–	+	–	+
3. Восстановление	+	–	+	+
4. Преобразование	–	–	+	+

Дадим пояснения к каждому свойству табл. 1.

Свойство «$|Y| > |X|$»: размерность выходных данных $|Y|$ превышает размерность входных данных $|X|$. Для задачи 3 это выражено в том, что на вход поступает поврежденная информация с отсутствующими значениями, фрагментами, либо кадр меньшего разрешения, а на выходе необходимо получить полноценное изображение.

Свойство «$|Y| < |X|$»: размерность выходных данных меньше размерности входных данных. Оно означает, что в ходе первой задачи будет производиться сжатие данных либо будет создан новый информационный объект, обладающий также меньшими размерами, чем исходный.

Свойство «$|Y| = |X|$»: размерность выходных и входных данных совпадает. Данное свойство выполняется для задач 3–4, так как при восстановлении изображения от шумов, преобразовании и прогнозировании следующего кадра ожидается графическая информация исходной размерности.

Свойство «Y задан» определяет необходимость подготовки размеченных выходных данных для успешного решения задачи. В задаче 1 это не требуется, так как в качестве выходных данных используются исходные входные. В задаче поиска необходимо разметить кадр (обозначить ключевые точки, сегменты, указать классы объектов), а в задаче восстановления – задать ожидаемый кадр без потерь или в высоком разрешении. В четвертой задаче выходные данные могут как обрабатываться на основе заданных алгоритмов, так и требоваться изначально, например, для прогнозирования или извлечения стиля.

Таким образом, обозначены основные классы задач обработки графической информации, далее необходимо сформулировать алгоритмы их решения.

Алгоритмы обработки графической информации

Для решения поставленных выше классов задач сформулируем общий алгоритм действий. Условно его можно разбить на три основные блока:

1. Предварительная обработка изображения. Включает этапы: извлечение данных из файла изображения с определением исходных размеров, количества цветовых каналов, нормализация значений интенсивности цвета (с переходом от целочисленного диапазона 0...255 к вещественному 0...1), выравнивание и преобразование размеров кадра под заданный формат (соотношение сторон, размеры, количество цветовых каналов). На выходе этапа формируется массив численных значений исходного изображения размером $X \times Y \times C$ (ширина, высота, цветовые каналы).

2. Основной этап обработки изображения. Реализует необходимые операции для решения задач, перечисленных в предыдущем разделе с использованием технологий компьютерного зрения, машинного обучения, преобразования данных.

Для каждой конкретной задачи требуется реализовать свой алгоритм данного этапа. Обобщенно в результате этапа формируется массив обработанных численных значений, удовлетворяющих требованиям поставленной задачи.

3. Сохранение итогового изображения. Полученный на выходе второго этапа массив информации преобразуется в графический файл требуемого размера, цветовой схемы, битности, формата, после чего сохраняется на накопитель.

Этапы 1 и 3 являются стандартными в сфере обработки изображений и реализуются средствами программных библиотек выбранного языка программирования. Наибольший интерес представляет этап 2 из-за наличия специфики в каждом классе рассмотренных задач. Реализуем алгоритмы решения задач для каждого из классов. В качестве инструмента решения задач будем использовать язык программирования Python, библиотеки обработки изображений, машинного обучения и компьютерного зрения.

Блок схема реализации основного этапа обработки изображений для задачи класса «Сжатие» представлена на рис. 2. В зависимости от подзадачи сжатия используются различные программные библиотеки.

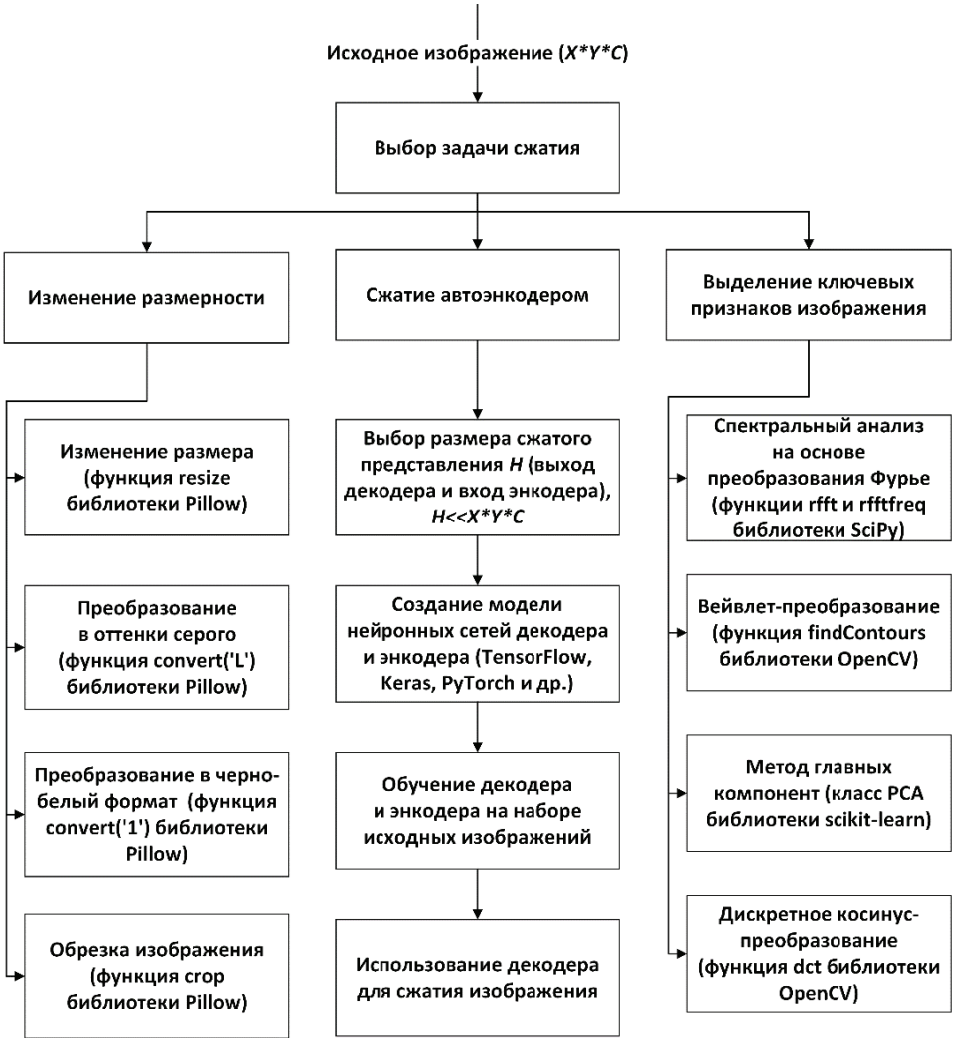


Рис. 2. Алгоритм решения задачи сжатия графической информации

Первой подзадачей можно выделить изменение размерности изображения. Для ее решения можно выделить четыре различных метода, которые можно найти для применения в библиотеке Pillow. Первый метод – это изменение размера изображения. В основе данного метода лежит принцип выполнения аффинных преобразований (поворот, растяжение/сжатие, сдвиг) над изображением. Следующий метод – преобразование цветового режима изображения к определенным оттенкам серого. Данный вариант преобразования изображения передает меньше информации об объектах, однако они распространены в обработке изображений, потому что использование изображения в оттенках серого требует меньше доступного пространства и увеличивает скорость вычислений. Также следует отметить еще один метод преобразования цветового режима – преобразование в черно-белый формат. Если прошлый метод содержал в себе 255 различных значений серого цвета, то для данной реализации используются лишь 2 варианта – черный и белый соответственно. Данный метод полезен при явном выделении объектов и удалении избыточной информации. Последним методом для подзадачи изменения размерности можно выделить метод обрезания изображений (crop), с помощью которого выделяется необходимый объект или область, а остальная часть отбрасывается за ненадобностью.

Сжатие изображения автоэнкодером – один из известных подходов, основанный на применении двух специализированных нейронных сетей (кодера и декодера), первая осуществляет сжатие данных в некоторое скрытое представление, а вторая – его обратное восстановление из представления в исходный вид. В процессе такого сжатия могут дополнительно быть удалены шумы, понижена резкость и качество, однако полученное сжатое представление включает набор ключевых признаков исходных данных и может использоваться для сравнения или анализа изображений.

Последним направлением для задач класса «Сжатие» является выделение ключевых признаков изображения, включающих огромное количество различных методов. Первым таким методом можно назвать спектральный анализ на основе преобразования Фурье [1]. Преобразование Фурье представляет спектральную функцию в виде суммы бесконечного числа тригонометрических функций с определенными амплитудами и фазами, рассматриваемыми на заданном отрезке. Также группой методов выделения ключевых признаков на изображении можно отметить вейвлет-преобразования [2]. К вейвлет-сжатию относится класс методов кодирования изображений с использованием двумерных функций-вейвлетов, которые позволяют раскладывать и анализировать данные в зависимости от их частотных компонентов. Результат операции заключается в том, чтобы усилить резкие перепады яркости, то есть выделить контуры изображения. Далее следует отметить метод главных компонент (PCA – Principal Component Analysis) [3]. Данный метод заключается в аппроксимации n-размерного количества признаков, в разной степени зависящих друг от друга, до эллипсоида, полуоси которого представляют собой главные компоненты, то есть если есть два признака, коррелирующих друг с другом, то при применении метода PCA находится признак-комбинация, выражающая два предыдущих признака одним новым. Далее стоит отметить дискретное косинус-преобразование (DCT – Discrete Cosine Transform), при использовании которого изображение разбивается на блоки. Затем они конвертируются в набор коэффициентов косинусных функций с возрастающими частотами [4].

Следующее направление – поиск информации на изображении (рис. 3).

В данном направлении также выделено три подзадачи. Одной из них является сегментация и определение ключевых точек. Сегментация – процесс разделения цифрового изображения на несколько сегментов. Цель сегментации заключается

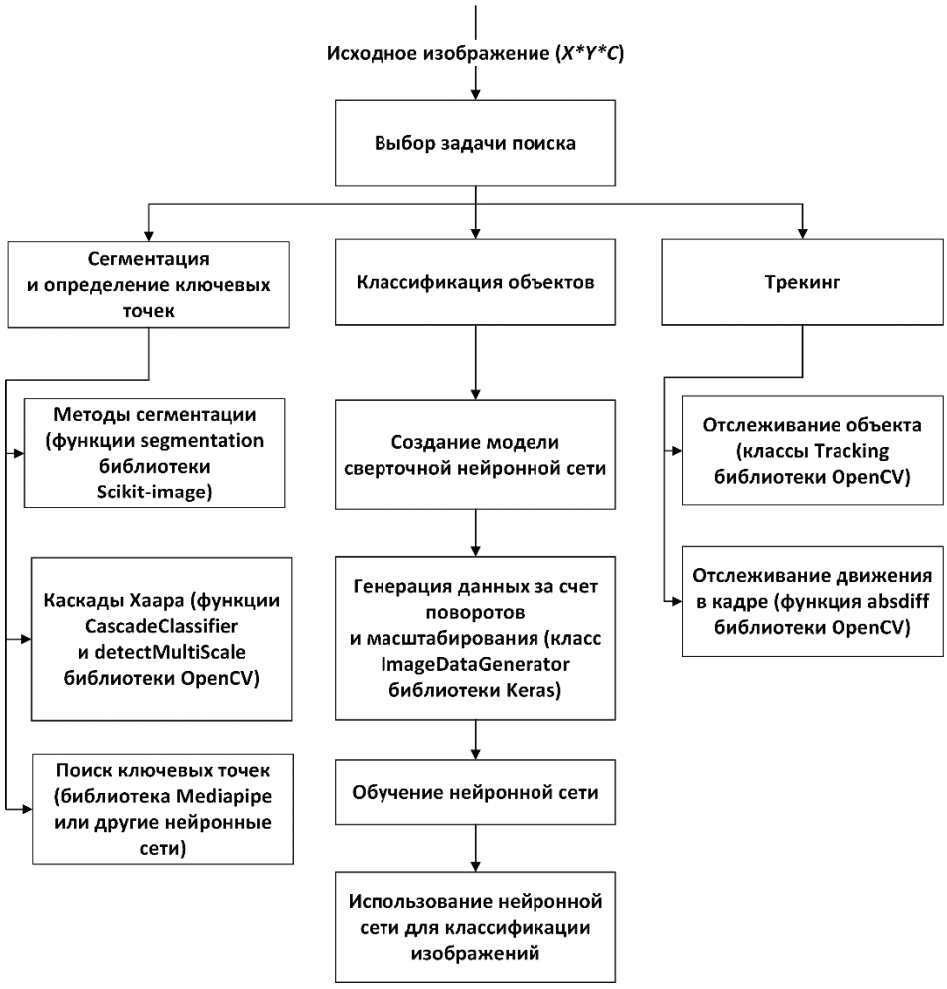


Рис. 3. Алгоритм решения задачи поиска информации на изображении

в упрощении и/или изменении представления изображения, чтобы его было проще и легче анализировать. Сегментация изображений обычно используется для того, чтобы выделить объекты и границы (линии, кривые, и т. д.) на изображениях. Для выделения ключевых точек могут быть использованы различные нейронный сети, например, библиотека Media Pipe Hands. Она состоит из двух модулей, один из которых распознает требуемый объект, а другой распределяет ключевые точки вдоль распознанного объекта.

Второй подзадачей выделена классификация объектов на изображении. Данная подзадача решается созданием и обучением сверточной нейронной сети [5]. Сверточная нейросеть является алгоритмом глубокого обучения, способным получать в качестве ввода изображение, присваивать степень важности различным его аспектам/объектам и отличать одно от другого.

Для трекинга объектов в библиотеке OpenCV существует много реализаций: BOOSTING, MIL, KCF, CSRT, MedianFlow, MOSSE, GOTURN. Чтобы определиться с выбором того или иного алгоритма следует понимать слабые и сильные их стороны. Рассмотрим два часто используемых способа распознавания объектов: CSRT и KCF. Способ CSRT (*англ.* Discriminative Correlation Filter with Channel and Spatial Reliability) используется, когда нужна высокая точность

отслеживания объектов и не значительно количество кадров в секунду. Этот алгоритм использует карты пространственной надежности для настройки поддержки фильтра на часть выделенной области из кадра для отслеживания, что дает возможность увеличить область поиска и отслеживать непрямоугольные объекты. Показатели надежности отражают качество исследуемых фильтров по каналам и используются в качестве весов для локализации [6]. Способ KCF (*англ.* Kernelized Correlation Filters) применяется, когда необходима большая пропускная способность FPS и не нужна существенная точность отслеживания объектов. Данный метод представляет собой комбинацию из существующих в OpenCV алгоритмов BOOSTING и MIL. Суть метода заключается в том, что набор изображений, полученный методом MIL, имеет множество перекрывающихся областей. Корреляционная фильтрация, примененная к этим областям, позволяет с высокой точностью отслеживать перемещение объекта и прогнозировать его дальнейшее положение [7]. Также для трекинга движущихся объектов можно применять функцию absdiff библиотеки OpenCV. Работа данной функции заключается в том, что каждый следующий кадр вычитается из предыдущего, разница этих изображений и будет являться движущейся целью.

Следующей темой для работы с изображениями посредством использования нейронных сетей является описание задач класса «Восстановление» (рис. 4).

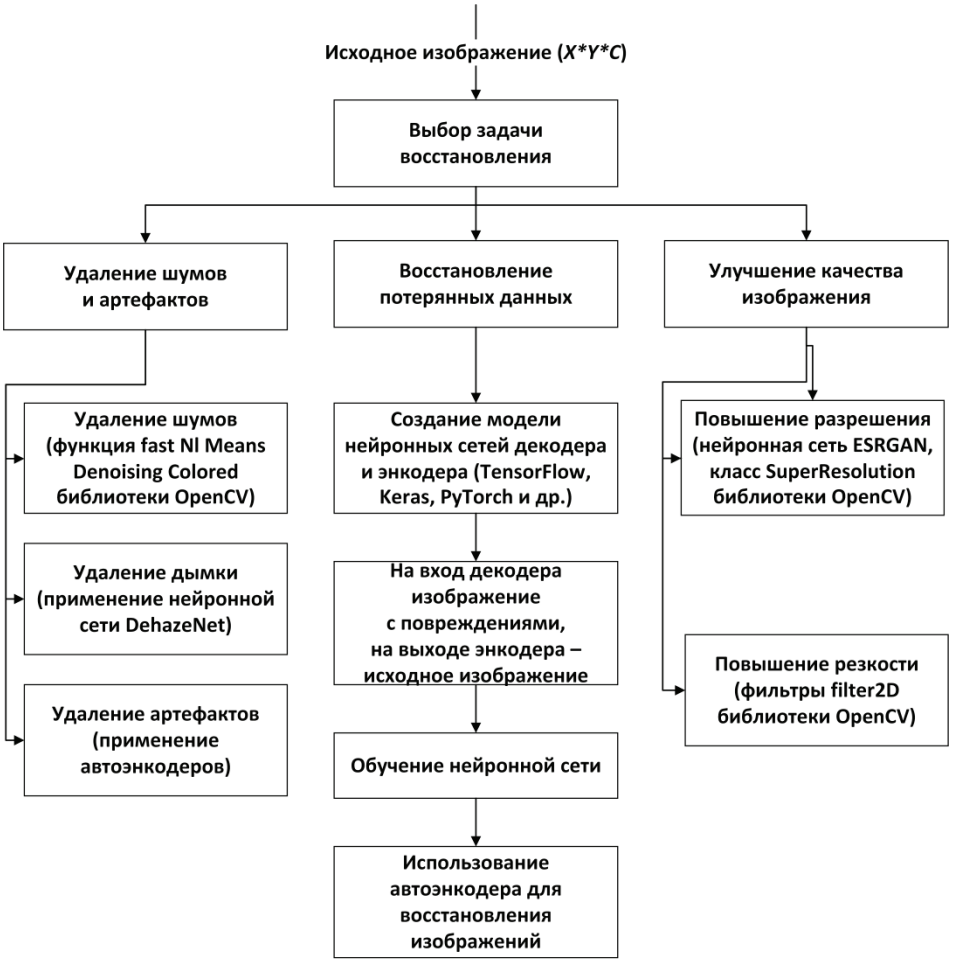


Рис. 4. Алгоритм решения задачи восстановления графической информации

Рассмотрим первую подзадачу – удаление шумов и артефактов. Первым для рассмотрения является метод удаление шумов на изображении, реализованный в функции fast NlMeans Denoising Colored в библиотеке OpenCV. Идеей алгоритма является подбор похожих участков изображения и их усреднение для сглаживания. Следующим методом является применение нейронной сети DehazeNet для удаления дымки. Данная нейронная сеть принимает затуманенное изображение в качестве входных данных и выводит свою карту среднего пропускания изображения, которая впоследствии будет использоваться для восстановления изображения без дымки. Далее рассмотрим, как с помощью нейронной сети автоэнкодера удалять артефакты на изображении. Автоэнкодер принимает на вход данные (картинку) и переводит их в функцию, а далее восстанавливает входные данные по их функции. То есть в процессе удаления артефактов нейронная сеть пытается выучить такую тождественную функцию, которая сможет минимизировать функционал ошибки.

Рассмотрим процессы восстановления потерянных данных. Для решения этой задачи можно применять одну из библиотек нейронных сетей: TensorFlow, Keras, PyTorch и др. Для примера выберем библиотеку Keras. Для того чтобы обучить нейронную сеть, необходимо сравнивать зашумленные данные с данными без шума. Сначала необходимо создать модель, которая будет видоизменять исходное изображение, для этого можно использовать класс Image Data Generator. Затем обучаем нейронную сеть посредством подачи исходного изображения и зашумленного.

Улучшения качества изображения можно добиться, применяя класс Super Resolution библиотеки OpenCV, который повышает качество изображения методами масштабирования или улучшения деталей. Так как для увеличения размеров изображения лишние пиксели нужно интерполировать, то для решения этой задачи в OpenCV реализованы 4 метода: EDSR, ESPCN, FSRCNN, LapSRN [8 – 11]. Первые 3 алгоритма предлагают коэффициент масштабирования в 2, 3 и 4 раза больше исходного размера, а последний – в 2, 4 и 8 раз.

Одно из крупнейших направлений в обработке графических данных – их преобразование (рис. 5). Первой подзадачей преобразования изображений рассмотрим применение эффектов. Для применения фильтров на изображении используется функция filter модуля Image Filter. В данном модуле содержится набор фильтров: BLUR – размытие, CONTOUR – контур, DETALL – детализация, EDGE_ENHANCE – улучшение краев, EDGE_EHANCE_MORE – усиленное улучшение краев, EMBOSS – рельеф, FIND_EDGES – поиск по краю, SMOOTH – сглаживание, SMOOTH_MORE – усиленное сглаживание, SHARPEN – резкость. Также для применения эффектов на изображении возможно использование функции cvtColor, при изменении параметров которой происходит преобразование изображения из одного цветового пространства в другое.

Далее следует изучить способ изменения стиля изображения. Neural style transfer библиотеки Tensor flow Hub – одно из приложений компьютерного зрения с использованием глубокого обучения [12]. В этом методе два изображения – на первом будет основываться основное содержание результирующего изображения, другое будет его стилем. Подход, который используется для решения задачи, заключается в использовании глубоких сетей, например, модели трансферного обучения сверточной нейронной сети VGG-19. Через модель VGG-19 будут отправлены три параметра, а именно изображение-содержание, изображение-стиль и сгенерированное изображение. Сгенерированное изображение первоначально инициализируется как шум, затем, после процесса обучения, оно станет похоже на сочетание картинок контента и стиля. При передаче входных данных

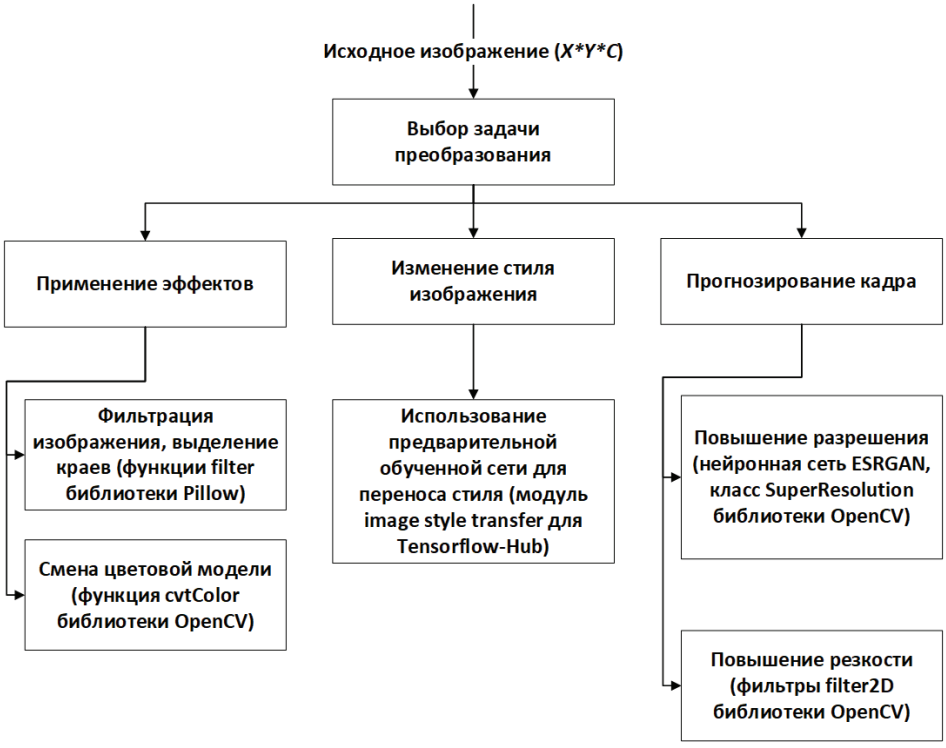


Рис. 5. Алгоритм решения задачи преобразования графической информации

слоям VGG-19 обеспечивается удаление выходных и плотных слоев, чтобы это была плотная свертка, содержащая только сверточные и объединяющие слои.

Как пример методов прогнозирования изображений можно привести нейронную сеть ESRGAN и ее класс Super Resolution, находящиеся в библиотеке OpenCV [13]. Методы реконструируют изображение или последовательность с более высоким разрешением из существующих изображений с более низким разрешением, например, масштабирование изображения 720p до 1080p. А также для прогнозирования кадра возможно использование filter2D библиотеки OpenCV. При работе с изображениями в обработке изображений filter2D функция используется для изменения значения интенсивности пикселей изображения на основе значений интенсивности окружающих пикселей. Данный метод может улучшить или удалить определенные функции изображения для создания нового изображения.

Применение алгоритмов обработки изображения в процессе управления на основе компьютерного зрения

Представленные в работе алгоритмы обработки изображений находят применение при реализации различных систем управления, основанных на компьютерном зрении. Рассмотрим некоторые примеры успешного внедрения данных алгоритмов.

Одним из наиболее развивающихся направлений применения компьютерного зрения является разработка автопилотов для наземного транспорта. При их реализации используется большая цепочка взаимосвязанных алгоритмов обработки изображения: поиск движущихся объектов, выделение контуров, удаление шу-

мов и тумана, после чего – распознавание и классификация объектов. На основе полученной с кадра информации формируется управляющее воздействие на систему автопилотирования: изменить скорость или траекторию движения. Подобные системы также внедряются в авиакосмической отрасли.

В промышленности технологии компьютерного зрения активно применяются для реализации автоматических систем управления конвейерами, станками, сборочными роботами. Рассмотренные в работе алгоритмы позволяют оценить состояние детали, ее размеры и класс, осуществить компоновку деталей в изделие и выполнить другие технологические операции. При этом, помимо решения непосредственно задач управления оборудованием, компьютерное зрение позволяет осуществлять мониторинг изготавливаемой продукции, отслеживать степень износа оборудования, предупреждать о возникающих чрезвычайных ситуациях.

В сельском хозяйстве алгоритмы обработки изображений позволяют отслеживать состояние зерновых и плодово-ягодных культур, осуществлять управление роботизированными комплексами по их сбору и обработке, повысить точность позиционирования орудий обработки, в том числе автоматизировать сельскохозяйственные процесса за счет использования автопилотов.

Таким образом, востребованность рассмотренных подходов к обработке изображений при решении задач управления крайне высока. Современные автоматические системы управления для обеспечения высокого уровня надежности особенно в условиях присутствия человека должны постоянно отслеживать состояние окружающей среды и корректно реагировать на изменения в ней. Технологии компьютерного зрения и алгоритмы обработки изображений являются одним из эффективных инструментов для решения данной задачи.

Заключение

В рамках данной статьи рассмотрена классификация задач обработки изображений, возникающих при реализации систем управления, среди которых выделены четыре основных направления: сжатие, поиск, восстановление и преобразование. Для каждой категории представлены основные алгоритмы обработки изображений, а также программные библиотеки для их реализации.

Проанализированные в работе алгоритмы обработки изображений основываются на математических преобразованиях, применении методов машинного обучения и компьютерного зрения. Показаны основные направления их применения в современных системах управлениях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках гранта Президента РФ МК-857.2022.1.6.

Список литературы

1. Image Registration with Fourier-Based Image Correlation: A Comprehensive Review of Developments and Applications / X. Tong, Z. Ye, Y. Xu [et al.] // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2019. – Vol. 12, No. 10. – P. 4062 – 4081. doi: 10.1109/JSTARS.2019.2937690

2. Выделение границ на изображениях на основе модели энергетических признаков вейвлет-преобразования / М. П. Шлеймович, А. П. Кирпичников, С. А. Ляшева, М. В. Медведев // Вестн. Казанского технологического ун-та. – 2017. – Т. 20, № 21. – С. 103 – 107.

3. Kurita, T. Principal Component Analysis (PCA) / T. Kurita // Computer Vision: A Reference Guide. – Springer, Cham., 2021. – P. 1013 – 1016.

4. Dct-Mask: Discrete Cosine Transform Mask Representation for Instance Segmentation / X. Shen, J. Yang, C. Wei [et al.] // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2021. – P. 8720 – 8729.

5. Сирота, А. А. Анализ алгоритмов поиска объектов на изображениях с использованием различных модификаций сверточных нейронных сетей / А. А. Сирота, Е. Ю. Митрофанова, А. И. Милованова // Вестн. Воронежского гос. ун-та. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2019. – № 3. – С. 123 – 137.

6. Discriminative Correlation Filter TracNer with Channel and Spatial Reliability / A. Lukezic, T. Vojir, L. Cehovin Zajc [et al.] // International Journal of Computer Vision. – 2018. – Vol. 126, No. 7. – P. 671 – 688. doi: 10.1007/s11263-017-1061-3

7. High-Speed Tracking with Kernelized Correlation Filters / J. F. Henriques, R. Caseiro, P. Martins, J. Batista // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2014. – Vol. 37, No. 3. – P. 583 – 596. doi: 10.1109/TPAMI. 2014.2345390

8. Enhanced Deep Residual Networks for Single Image Super-Resolution / B. Lim, S. Son, H. Kim [et al.] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. – 2017. – P. 136 – 144.

9. Real-Time Single Image and Video Super-Resolution Using an Efficient Sub-Pixel Convolutional Neural Network / W. Shi, J. Caballero, F. Huszár [et al.] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2016. – P. 1874 – 1883.

10. Dong, C. Accelerating the Super-Resolution Convolutional Neural Network / C. Dong, C. C. Loy, X. Tang // European Conference on Computer Vision. – 2016. – P. 391 – 407.

11. Fast and Accurate Image Super-Resolution with Deep Laplacian Pyramid Networks / W. S. Lai, J. B. Huang, N. Ahuja, M. H. Yang // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2018. – Vol. 41, No. 11. – P. 2599 – 2613.

12. Gatys, L. A. A Neural Algorithm of Artistic Style / L. A. Gatys, A. S. Ecker, M. A. Bethge // Journal of Vision. – 2016. – Vol. 16, No. 12. – P. 1 – 16. doi: 10.1167/16.12.326

13. Esrgan: Enhanced Super-Resolution Generative Adversarial Networks / X. Wang, K. Yu, S. Wu [et al.] // Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV) Workshops. – 2018. – P. 1 – 16.

Data Processing Algorithms in Automatic Control Systems Based on Computer Vision

A. D. Obukhov, K. I. Patutin, A. O. Nazarova

Department of Automated Decision Support Systems,
obuhov.art@gmail.com; TSTU, Tambov, Russia

Keywords: information processing algorithms; computer vision; machine learning; image conversion.

Abstract: The main algorithms for processing graphic information are used to organize the management process based on computer vision technologies. The initial data in most cases require pre-processing, including reduction of their dimension,

extraction of key features, transformation, restoration and quality improvement. The main classes of problems in this subject area and algorithms for their solution, including both the mathematical transformation of images and the use of machine learning and computer vision technologies in automatic control systems, are considered.

References

1. Tong X., Ye Z., Xu Y. [et al.] Image Registration with Fourier-Based Image Correlation: A Comprehensive Review of Developments and Applications, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2019, vol. 12, no. 10, pp. 4062-4081, doi: 10.1109/JSTARS.2019.2937690

2. Shleymovich M.P., Kirpichnikov A.P., Lyasheva S.A., Medvedev M.V. [Boundary detection on images based on the model of energy features of the wavelet transform], *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University], 2017, vol. 20, no, 21, pp. 103-107. (In Russ.)

3. Kurita T. *Computer Vision: A Reference Guide*, Springer, Cham., 2021, pp. 1013-1016.

4. Shen X., Yang J., Wei C. [et al.] Dct-Mask: Discrete Cosine Transform Mask Representation for Instance Segmentation, *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2021, pp. 8720-8729.

5. Sirota A.A., Mitrofanova Ye.Yu., Milovanova A.I. [Analysis of object search algorithms in images using various modifications of convolutional neural networks], *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyy analiz i informatsionnyye tekhnologii* [Bulletin of the Voronezh State University. Series: System Analysis and Information Technologies], 2019, no. 3, pp. 123-137. (In Russ., abstract in Eng.)

6. Lukezic A., Vojir T., Cehovin Zajc L., Matas J., Kristan M. Discriminative Correlation Filter TracNer with Channel and Spatial Reliability, *International Journal of Computer Vision*, 2018, vol. 126, no. 7, pp. 671-688, doi: 10.1007/s11263-017-1061-3

7. Henriques J.F., Caseiro R., Martins P., Batista J. High-Speed Tracking with Kernelized Correlation Filters, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2014, vol. 37, no. 3, pp. 583-596, doi: 10.1109/TPAMI. 2014.2345390

8. Lim B., Son S., Kim H., Nah S., Lee K.M. Enhanced Deep Residual Networks for Single Image Super-Resolution, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, 2017, pp. 136-144.

9. Shi W., Caballero J., Huszár F. [et al.] Real-Time Single Image and Video Super-Resolution Using an Efficient Sub-Pixel Convolutional Neural Network, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2016, pp. 1874-1883.

10. Dong C., Loy C.C., Tang X. Accelerating the Super-Resolution Convolutional Neural Network, *European Conference on Computer Vision*, 2016, pp. 391-407.

11. Lai W.S., Huang J.B., Ahuja N., Yang M.H. Fast and Accurate Image Super-Resolution with Deep Laplacian Pyramid Networks, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2018, vol. 41, no. 11, pp. 2599-2613.

12. Gatys L.A., Ecker A.S., Bethge M.A. A Neural Algorithm of Artistic Style, *Journal of Vision*, 2016, vol. 16, no. 12, pp. 1-16, doi: 10.1167/16.12.326

13. Wang X., Yu K., Wu S. [et al.] Esrgan: Enhanced Super-Resolution Generative Adversarial Networks, *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV) Workshops*, 2018, pp. 1-16.

Datenverarbeitungsalgorithmen in automatischen Steuersystemen

Zusammenfassung: Es sind die wichtigsten Algorithmen für die Verarbeitung der grafischen Information zur Organisation des Steuerprozesses auf der Grundlage von Computer-Vision-Technologien dargelegt. Die Ausgangsdaten erfordern in den meisten Fällen eine Vorverarbeitung, einschließlich der Verringerung ihrer Dimension, der Hervorhebung von Schlüsselmerkmalen, der Transformation, der Wiederherstellung und der Qualitätsverbesserung. Die Hauptklassen von Problemen auf diesem Fachgebiet und Algorithmen deren Lösungen sind betrachtet, darunter sowohl mathematische Transformation von Bildern als auch die Anwendung von maschinellen Lerntechnologien und Computer-Vision-Technologien in automatischen Steuersystemen.

Algorithmes du traitement des données dans les systèmes de contrôle automatiques

Résumé: Sont décrits les principaux algorithmes du traitement graphique des informations utilisées pour organiser le processus de commande basé sur la technologie de vision par ordinateur. Dans la plupart des cas, les données brutes nécessitent un prétraitement, y compris une réduction de leur dimensionnalité, la division des caractéristiques clés, la transformation, la restauration et l'amélioration de la qualité. Sont examinés les principales classes de tâches dans ce domaine et les algorithms de leurs solutions impliquant à la fois la transformation mathématique des images et l'application des technologies d'apprentissage automatique et de vision par ordinateur dans les systèmes de commande automatiques.

Авторы: ***Обухов Артем Дмитриевич*** – доктор технических наук, доцент кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений»; ***Патутин Кирилл Игоревич*** – магистрант; ***Назарова Александра Олеговна*** – студент, ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

УДК 006.91
DOI: 10.17277/vestnik.2022.04.pp.586-595

ГАРМОНИЗАЦИЯ МЕЖДУНАРОДНЫХ И НАЦИОНАЛЬНЫХ ФОРМ ПОДТВЕРЖДЕНИЯ СООТВЕТСТВИЯ МЕТОДИК ИЗМЕРЕНИЙ

В. Ш. Сулаберидзе, А. А. Неклюдова

Научно-исследовательская лаборатория госэталонов в области измерений плотности и вязкости жидкости, A.A.Tsurko@vniim.ru; ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева», Санкт-Петербург, Россия

Ключевые слова: аттестация; валидация; верификация; методика измерений; методика калибровки; оценка соответствия; поверка; подтверждение соответствия; референтная методика измерений.

Аннотация: Проанализированы формы оценки и подтверждения соответствия требованиям методик калибровки эталонов и средств измерений, методик измерений и референтных методик измерений как в международной, так и отечественной практике. Продемонстрирована потребность и необходимость в максимальной гармонизации терминологии в данной области. Приведена схема, иллюстрирующая соотношение рассматриваемых понятий в области оценки соответствия методик выполнения измерений. Показаны области применения действующих НД по методикам измерений, калибровки и референтным методикам. Предложена схема иерархии метрологической прослеживаемости, объединяющая измерения, основанные на референтных методиках измерений разного уровня и аттестованных с помощью стандартных образцов и образцов сравнения.

Введение

К рассматриваемым в статье методикам измерений (**МИ**) относятся: методики (методы) измерений (за исключением методик прямых измерений) по ГОСТ Р 8.563–2009 и ГОСТ 8.010–2013 [1, 2], методики калибровки средств измерений (**СИ**) по ГОСТ Р 8.879–2014 [3] и референтные методики измерений по ГОСТ Р ИСО 15193–2015 и ГОСТ 17511–2011 [4, 5].

Стандарт ГОСТ Р 8.879–2014 устанавливает основные требования к построению, содержанию и изложению методик калибровки средств измерений в соответствии с положениями ГОСТ ИСО/МЭК 17025 [6]. В нем даны определения метрологической пригодности и целевой неопределенности измерений:

– оценка пригодности – подтверждение путем исследования и предоставления объективных доказательств того, что конкретные требования к специфическому целевому использованию выполняются (ст. 2.3);

– целевая неопределенность измерений – неопределенность измерений, заранее установленная как *верхний предел* и принятая, *исходя из предполагаемого использования* результатов измерений (ст. 2.5).

В статье 4.7 также подчеркивается важность наличия в методике калибровки «требований, обеспечивающих прослеживаемость измерений, выполняемых откалиброванными средствами измерений, до государственных первичных эталонов или национальных первичных эталонов иностранных государств».

Стандарт ГОСТ Р 8.563–2009 распространяется на методики (методы) измерений, включая методики количественного химического анализа, и устанавливает общие положения и требования, относящиеся к разработке, аттестации, стандартизации, применению методик измерений и метрологическому надзору за ними. В стандарте дано определение показателя точности измерений, достигаемой при соблюдении требований и правил данной методики измерений. В качестве показателя точности методики измерений могут быть использованы характеристики погрешности и/или неопределенности измерений в соответствии с ГОСТ Р ИСО 5725.1.

Методики измерений разрабатывают и применяют с целью обеспечить выполнение измерений с требуемой точностью. В стандарте также сформулировано важное требование к методикам измерений: «документы, предназначенные для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений и содержащие методики измерений, должны включать в себя сведения об аттестации методик измерений, а также сведения о наличии их в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений» (ст. 4.3).

Что касается методик измерений, применяемых вне сферы государственного регулирования обеспечения единства измерений, то их аттестация может быть проведена в добровольном порядке. Важно отметить, что к исходным данным при разработке методик измерений относятся требования к показателям точности измерений и условиям выполнения измерений.

В нормативных документах по референтным методикам измерений [4, 5, 7] отмечается, что их разработка направлена на создание нормативной базы для более широкого распространения принципа прослеживаемости при измерениях величин, характеризующих химический состав и физико-химические свойства различных объектов.

Прослеживаемость измерений при решении лабораториями вышеуказанных задач во многих случаях не может быть достигнута традиционным для классической метрологии способом, то есть с использованием эталонов единиц величин, являющихся элементами поверочной схемы. Референтные методики измерений, аттестованные с их помощью стандартные образцы веществ и материалов и результаты сличений и межлабораторных сравнительных испытаний получили широкое распространение в биологии и медицине для измерения величин, характеризующих состав и физико-химические свойства объектов. В рекомендациях Р 50.2.081-2011 подчеркивается, что такой подход может быть использован испытательными лабораториями и метрологическими службами предприятий.

В данной статье основное внимание уделено формам оценки и подтверждения соответствия именно методик, а не средств измерений. С точки зрения обеспечения метрологической прослеживаемости результатов измерений и правомерности применения методик измерений, они должны пройти процедуры оценки и подтверждения соответствия метрологическим требованиям.

В соответствии с международным словарем в области оценки соответствия ИСО 17000 [8]:

– оценка соответствия (*conformity assessment*) – доказательство того, что заданные требования к продукции, процессу, системе, лицу или органу выполнены (ст. 2.1);

– подтверждение соответствия (*attestation*) – выдача заявления, основанного на принятом после итоговой проверки решении о том, что выполнение заданных требований доказано (статья 5.2).

Анализ проблемы

Методика косвенных измерений, методика калибровки и референтная методика измерений являются родственными понятиями, поскольку во всех случаях целью является получение результата измерений: методика (метод) измерений – совокупность конкретно описанных операций, выполнение которых обеспечивает получение результатов измерений с установленными показателями точности [1, ст. 3.1]. В то же время, между ними имеются некоторые различия, связанные с особенностями схем метрологической прослеживаемости, содержания стадий жизненного цикла от разработки до регистрации и применения, исполнителя отдельных стадий и его ответственности, а также преимущественных форм оценки и подтверждения соответствия.

Формы оценки и подтверждения соответствия различаются по объекту (средства измерений, методики выполнения измерений) и месту в иерархии метрологической прослеживаемости (уровень/статус). Уровень СИ определяется местом в иерархической структуре передачи единицы величины. Иерархию СИ в отечественной практике устанавливают государственные и локальные поверочные схемы [9, 10], калибровочную иерархию – рекомендации Международной организации законодательной метрологии [11] и иерархию метрологической прослеживаемости референтных методик измерений – нормативные документы, относящиеся в первую очередь к методикам количественного химического и микробиологического анализов [4, 5, 7, 12].

На рисунке 1 приведена схема, состоящая из трех блоков: методика, форма оценки и подтверждения соответствия, сторона – участник и ответственный исполнитель. Разработку методики измерений может осуществлять поставщик/разработчик средств измерений или третья сторона, аккредитованная на право проведения этих работ (калибровочная лаборатория). Что касается референтных методик измерений, то их разработка осуществляется референтной лабораторией (первичной референтной или просто референтной), аккредитованной соответствующим образом. В этом случае за референтной лабораторией закрепляется право на разработку и аттестацию стандартных образцов/калибраторов, служащих для реализации принципа прослеживаемости результатов измерений, проводимых конечными пользователями (лабораториями рутинных измерений).

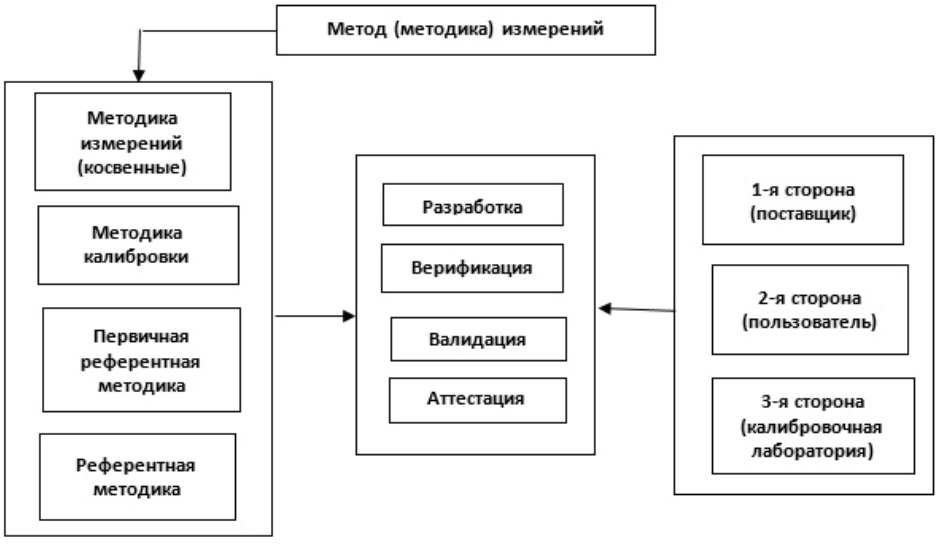


Рис. 1. Формы оценки и подтверждения соответствия и исполнители стадий жизненного цикла методик измерений

Верификация, валидация и характерная для отечественной практики в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений аттестация методик измерений осуществляются калибровочными и соответственно референтными лабораториями. Далее рассмотрим данные понятия.

Международный словарь по метрологии VIM 3 [13] определяет калибровку (*calibration*) СИ как «операцию, в ходе которой при заданных условиях на первом этапе устанавливают соотношение между значениями величин с неопределенностями измерений, которые обеспечивают эталоны, и соответствующими показаниями с присущими им неопределенностями, а на втором этапе на основе этой информации устанавливают соотношение, позволяющее получать результат измерения исходя из показания» (ст. 2.39).

Примечание 1. Калибровка может быть выражена как утверждение, функция калибровки, диаграмма калибровки, калибровочная кривая или таблица калибровки. В некоторых случаях она может включать аддитивную или мультипликативную поправку к показаниям с соответствующей неопределенностью.

Таким образом процедура калибровки является элементом определения метрологических характеристик СИ. Об этом же свидетельствует термин в ст. 3.1.3 РМГ 115-2019 [14]: калибровочная характеристика – оценка метрологической характеристики средства измерений с указанием соответствующей неопределенности, полученная при калибровке.

Примечание 3. Калибровочные характеристики измерительного прибора используются для определения измеренного значения по показаниям измерительного прибора и расчета инструментальной составляющей неопределенности.

Что касается методик измерений, то в данном случае имеются ввиду косвенные измерения, как отмечено в [1], а именно:

«Стандарт не распространяется на методики измерений, предназначенные для выполнения прямых измерений, то есть методики, в соответствии с которыми искомое значение величины получают непосредственно от средства измерений. Такие методики измерений вносят в эксплуатационную документацию на средства измерений. Подтверждение соответствия этих методик обязательным метрологическим требованиям осуществляется в процессе утверждения типов данных средств измерений».

В статье [15] подробно проанализирована потребность в гармонизации применяемой в нормативных документах (**НД**) терминологии по оценке и подтверждению соответствия средств и методик выполнения измерений метрологическим требованиям. В международных НД, в частности, в стандарте ИСО 9000 [16] приведены следующие определения:

– 3.8.12 верификация (*verification*): подтверждение посредством представления объективных свидетельств того, что установленные требования были выполнены;

– 3.8.13 валидация (*validation*): подтверждение посредством представления объективных свидетельств того, что требования, предназначенные для конкретного использования или применения, выполнены.

Применительно к СИ процедуры верификации и валидации заканчиваются выдачей соответствующего сертификата/свидетельства. Например, согласно VIM 3, в результате верификации может быть подтверждено, что целевая неопределенность достигнута (ст. 2.44). В сфере законодательного регулирования обеспечения единства измерений в отечественной практике формой подтверждения соответствия метрологических характеристик СИ требованиям является поверка, которая в данном случае является синонимом валидации. Поверка СИ определена в [17] как:

– поверка (средств измерений) – установление официально уполномоченным органом пригодности средства измерений к применению на основании экспериментально определяемых метрологических характеристик и подтверждения их соответствия установленным обязательным требованиям (ст. 9.9).

В русскоязычном переводе международного словаря по метрологии [13] термин валидация (ст. 2.45) переведен как аттестация. В отечественной практике аттестация является формой подтверждения соответствия методик измерений требованиям и в первую очередь обязательным требованиям в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений. В Рекомендациях [1] аттестация методик (методов) измерений определена как исследование и подтверждение соответствия методик измерений установленным метрологическим требованиям к измерениям (ст. 3.2).

Документы, предназначенные для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений и содержащие методики измерений, должны включать сведения об их аттестации и о регистрации в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений (**ОЕИ**). Аттестация методик измерений, применяемых вне сферы государственного регулирования обеспечения единства измерений, может быть проведена в добровольном порядке.

Методика выполнения измерений характеризуется показателем точности [1]:

– показатель точности измерений – установленная характеристика точности любого результата измерений, полученного при соблюдении требований и правил данной методики измерений (ст. 3.4).

Соотношение форм подтверждения соответствия МИ представлено на рис. 2.

Потребность в референтной методике измерений, как в элементе системы метрологической прослеживаемости, возникает в отсутствие рабочего эталона, входящего в состав иерархической схемы калибровки (поверочной схемы), что характерно для методов количественного химического и микробиологического анализов.

Согласно [13]:

– референтная методика измерений – методика измерений, принятая для получения результатов измерений, которые могут быть использованы для оценки правильности измеренных значений величины, полученных по другим методикам измерений величин того же рода, а также для калибровки или определения характеристик стандартных образцов (ст. 2.7);

– первичная референтная методика измерений – референтная методика измерений, которая используется для получения результата измерения без сравнения с эталоном единицы величины того же рода (ст. 2.8).

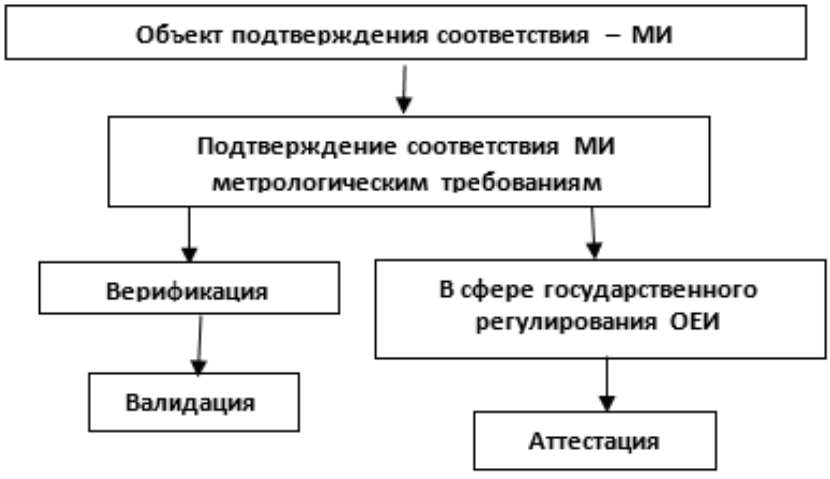


Рис. 2. Формы оценки и подтверждения соответствия метрологическим требованиям методик выполнения измерений

В этих определениях подчеркивается: 1) отсутствие прослеживаемости к эталону единицы величины и 2) возможность калибровки или определения характеристик стандартных образцов, выполняющих роль образцов сравнения или подтверждения квалификации.

В статье [18] проанализированы схемы метрологической прослеживаемости референтных методик измерений, содержащиеся в НД, и предложена схема, приведенная на рис. 3, где даны следующие обозначения: ГНМИ – Государственный научный метрологический институт; АЛРИ – аккредитованная лаборатория референтных измерений; ПРМИ – первичная референтная МИ; первичные МИ (**ПМИ**): 1 – масс-спектрометрия; 2 – кулонометрия; 3 – гравиметрия; 4 – титрометрия; 5 – криометрия.

Примечание: схемы метрологической прослеживаемости значений, приписанных калибраторам и контрольным материалам при измерении величин в биологических пробах в области медицины, подробно представлены в ГОСТ ISO 17511–2011 [5].

Разрабатываемые или верифицируемые и валидируемые (аттестуемые) МИ содержат следующие основные сведения: область распространения; назначение методики, метрологические характеристики, подлежащие определению, и целевая неопределенность; характеристики оборудования и программного обеспечения; метод передачи единицы величины; условия и процедура калибровки; обработка результатов калибровки; оценка неопределенности измерений и др.

В процессе верификации и валидации методик калибровки/измерений должны проводиться проверка соответствия метрологических характеристик обязательным метрологическим требованиям к измерениям; оценка правильности

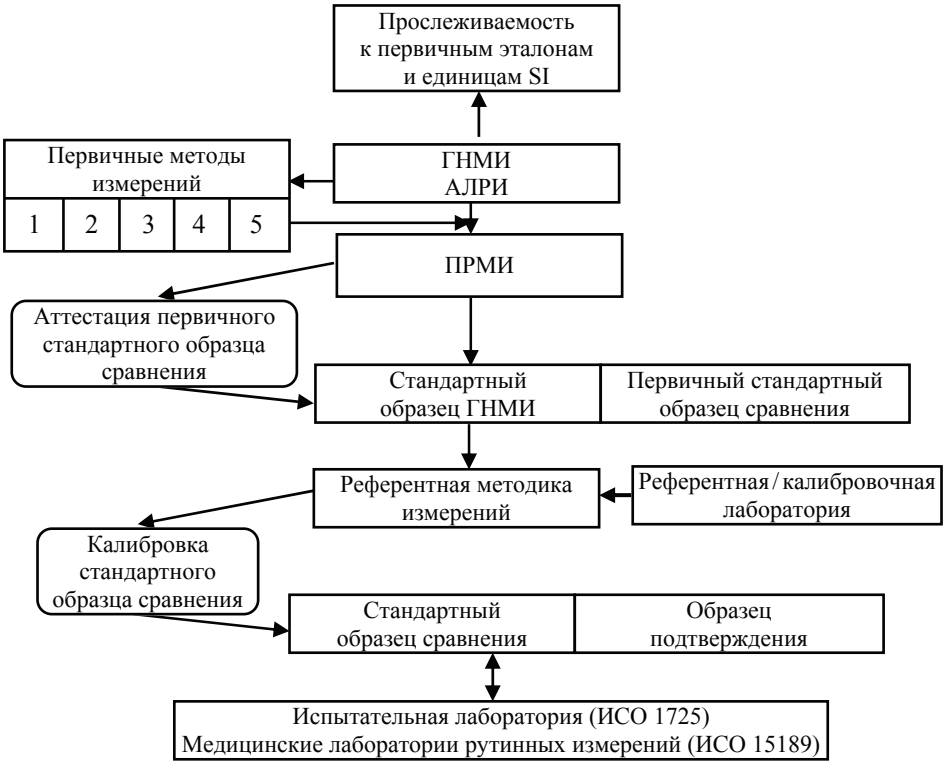


Рис. 3. Схема метрологической прослеживаемости результата измерений на основе РМИ, объединяющая различные области измерений

и обоснованности выбора метода измерений, средств измерений, эталонов, стандартных образцов, программного обеспечения, вспомогательных и других технических средств, реактивов и материалов; оценка корректности принятых математических моделей и алгоритмов обработки данных, способов представления результатов измерений; оценки метрологической прослеживаемости измерений, выполняемых по МИ и выполненных при их разработке.

Заключение

Проанализированы приводимые в международных и национальных НД формы оценки и подтверждения соответствия требованиям методик калибровки средств измерений; выполнения измерений и референтных МИ. Показана актуальность и необходимость в максимальной гармонизации терминологии в данной области. Приведена схема, иллюстрирующая соотношение рассматриваемых терминов в области оценки соответствия методик выполнения измерений. Предложена также схема метрологической прослеживаемости, объединяющая измерения, основанные на референтных методиках измерений и аттестованных с их помощью стандартных образцах, осуществляемые в методиках количественного химического и микробиологического анализов.

Придерживаясь правила максимальной гармонизации терминов, мы тем самым повышаем уровень соответствия калибровочной лаборатории требованиям к компетентности [6], что в свою очередь увеличивает уровень доверия и признания результатов измерений, получаемых данной лабораторией.

Список литературы

1. ГОСТ Р 8.563–2009. Методики (методы) измерений. – Взамен ГОСТ Р 8.563-96 ; введ. 2010-04-15. –М. : Стандартинформ, 2019. – 16 с.

2. ГОСТ 8.010–2013. Методики выполнения измерений. Основные положения. – Введ. 2015-03-01. – М. : Стандартинформ, 2020. – 15 с.

3. ГОСТ Р 8.879–2014. Методики калибровки средств измерений. Общие требования к содержанию и изложению. – Введ. 2015-09-01. – М. : Стандартинформ, 2015. – 7 с.

4. ГОСТ Р ИСО 15193–2015. Изделия медицинские для диагностики *in vitro*. Измерение величин в пробах биологического происхождения. Требования к описанию референтных методик выполнения измерений. – Взамен ГОСТ Р ИСО 15193-2007 ; введ. 2016-06-01. – М. : Стандартинформ, 2015. – 16 с.

5. ГОСТ ISO 17511–2011. Изделия медицинские для диагностики *in vitro*. Измерение величин в биологических пробах. Метрологическая прослеживаемость значений, приписанных калибраторам и контрольным материалам. – Введ. 2013-01-01. – М. : Стандартинформ, 2013. – 31 с.

6. ГОСТ ISO/IEC 17025–2019. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. – Взамен ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2009 ; введ. 2019-09-01. – М. : Стандартинформ, 2021. – 26 с.

7. Рекомендации по метрологии Р 50.2.081–2011 Лаборатории референтные. Основные положения. – Введ. 2013-03-01. – М. : Стандартинформ, 2013. – 16 с.

8. ГОСТ ISO/IEC 17000-2012 Оценка соответствия. Словарь и общие принципы. – Введ. 2013-09-01. – М. : Стандартинформ, 2014. – 18 с.

9. ГОСТ 8.061–80. Государственная система обеспечения единства измерений. Поверочные схемы. Содержание и построение. – Взамен ГОСТ 8.061-73 ; введ. 1981-01-01. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2002. – 10 с.

10. Об утверждении требований к содержанию и построению государственных поверочных схем и локальных поверочных схем, в том числе к их разработке, утверждению и изменению : приложение 1 к Приказу Минпромторга от 11.02.2020 г. № 456. – Текст : электронный // АО «Кодекс». – URL : https://docs.cntd.ru/document/564406678 (дата обращения: 07.10.2022).

11. OIML D5. Principles for the Establishment of Hierarchy Schemes for Measuring Instruments. – Текст : электронный // International Organization of Legal Metrology. – 1982. – 12 p. – URL : https://www.oiml.org/en/files/pdf_d/d005-e82.pdf (дата обращения: 07.10.2022).

12. МИ 3627-2020. Референтные и первичные референтные методики измерений. Рекомендации по разработке, аттестации и применению. – Введ. 2020-01-01. – М. : Стандартинформ, 2020. – 23 с.

13. JCGM:2008 Международный словарь по метрологии. Основные и общие понятия и соответствующие термины : пер. с англ. и фр. / Всероссийский науч.-исслед. ин-т метрологии им. Д. И. Менделеева ; Белорусский гос. ин-т метрологии. – 2-е изд., испр. – СПб. : Профессионал, 2010. – 82 с.

14. РМГ 115-2019. Государственная система обеспечения единства измерений. Калибровка средств измерений. Алгоритмы обработки результатов измерений и оценивания неопределенности. – Введ. 2020-09-01. – М. : Стандартинформ, 2019. – 32 с.

15. Сулаберидзе, В. Ш. О гармонизации терминологии в НД по оценке и подтверждению соответствия средств и методик выполнения измерений метрологическим требованиям / В. Ш. Сулаберидзе, А. Г. Чуновкина // Измерительная техника. – 2019. – № 3. – С. 8 – 12. doi: 10.32446/0368-1025it.2019-3-8-12

16. ГОСТ ИСО 9000-2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. – Введ. 2015-11-01. – М. : Стандартинформ, 2019. – 48 с.

17. РМГ 29-2013. Метрология. Основные термины и определения. – Взамен РМГ 29-99 ; введ. 2015-01-01. – М. : Стандартинформ, 2015. – 71 с.

18. Сулаберидзе, В. Ш. Метрологическая прослеживаемость референтных методик измерений / В. Ш. Сулаберидзе, Е. А. Скорнякова // Вопросы радиоэлектроники. – 2020. – № 10. – С. 6 – 12. doi: 10.21778/2218-5453-2020-10-6-12

Harmonization of International and National Forms of Confirmation of Conformity of Measurement Techniques

V. Sh. Sulaberidze, A. A. Neklyudova

Research Laboratory of State Standards in Liquid Density and Viscosity Measurements, A. A. Tsurko@vniim.ru;
D.I. Mendeleev All-Russian Research Institute of Metrology, St. Petersburg, Russia

Keywords: attestation; validation; verification; measurement technique; calibration technique; conformity assessment; verification; confirmation of compliance; reference measurement technique.

Abstract: The forms of assessment and confirmation of compliance with the requirements of calibration methods for standards and measuring instruments, measurement methods and reference measurement methods both in international and domestic practice are analyzed. The need and necessity for the maximum harmonization of terminology in this area is proved. A diagram illustrating the relationship between the concepts under consideration in the field of assessing the conformity of measurement methods is given. The areas of application of the existing ND on the methods of measurement, calibration and reference methods are shown. A metrological traceability hierarchy scheme, which combines measurements based on reference measurement methods of different levels and certified using standard samples and comparison samples, is proposed.

References

1. *GOST R 8.563-2009. Metodiki (metody) izmereniy* [GOST R 8.563-2009. Techniques (methods) of measurements], Moscow: Standartinform, 2019, 16 p. (In Russ.)

2. *GOST 8.010-2013. Metodiki vypolneniya izmereniy. Osnovnyye polozheniya* [GOST 8.010-2013. Measurement techniques. Basic provisions], Moscow: Standartinform, 2020, 15 p. (In Russ.)

3. *GOST R 8.879-2014. Metodiki kalibrovki sredstv izmereniy. Obshchiye trebovaniya k soderzhaniyu i izlozheniyu* [GOST R 8.879-2014. Methods of calibration of measuring instruments. General requirements for content and presentation], Moscow: Standartinform, 2015, 7 p. (In Russ.)

4. *GOST R ISO 15193-2015. Izdeliya meditsinskiye dlya diagnostiki in vitro. Izmereniye velichin v probakh biologicheskogo proiskhozhdeniya. Trebovaniya k opisaniyu referentnykh metodik vypolneniya izmereniy* [GOST R ISO 15193-2015. Medical products for in vitro diagnostics. Measurement of quantities in samples of biological origin. Requirements for the description of reference methods for performing measurements], Moscow: Standartinform, 2015, 16 p. (In Russ.)

5. *GOST ISO 17511-2011. Izdeliya meditsinskiye dlya diagnostiki in vitro. Izmereniye velichin v biologicheskikh probakh. Metrologicheskaya proslezhivayemost' znacheniy, pripisannykh kalibratoram i kontrol'nym materialam* [GOST ISO 17511-2011. Medical products for in vitro diagnostics. Measurement of quantities in biological samples. Metrological traceability of values assigned to calibrators and control materials], Moscow: Standartinform, 2013, 31 p. (In Russ.)

6. *GOST ISO/IEC 17025-2019. Obshchiye trebovaniya k kompetentnosti ispytatel'nykh i kalibrovochnykh laboratoriy* [GOST ISO/IEC 17025-2019. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories], Moscow: Standartinform, 2021, 26 p. (In Russ.)

7. *Rekomendatsii po metrologii R 50.2.081-2011 Laboratorii referentnyye. Osnovnyye polozheniya* [Recommendations on metrology P 50.2.081-2011 Reference laboratories. Basic provisions], Moscow: Standartinform, 2013, 16 p. (In Russ.)

8. *GOST ISO/IEC 17000-2012 Otsenka sootvetstviya. Slovar' i obshchiye printsipy* [GOST ISO/IEC 17000-2012 Conformity assessment. Vocabulary and general principles], Moscow: Standartinform, 2014, 18 p. (In Russ.)

9. *GOST 8.061-80. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya yedinstva izmereniy. Poverochnyye skhemy. Soderzhaniye i postroyeniye* [GOST 8.061-80. State system for ensuring the uniformity of measurements. Verification schemes. Content and construction], Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov, 2002, 10 p. (In Russ.)

10. https://docs.cntd.ru/document/564406678 (accessed 07 October 2022).

11. https://www.oiml.org/en/files/pdf_d/d005-e82.pdf (accessed 07 October 2022).

12. *MI 3627-2020. Referentnyye i pervichnyye referentnyye metodiki izmereniy. Rekomendatsii po razrabotke, attestatsii i primeneniyu* [MI 3627-2020. Reference and primary reference measurement methods. Recommendations for development, certification and application], Moscow: Standartinform, 2020, 23 p. (In Russ.)

13. *JCGM:2008 Mezhdunarodnyy slovar' po metrologii. Osnovnyye i obshchiye ponyatiya i sootvetstvuyushchiye terminy* [JCGM:2008 International Dictionary of Metrology. Basic and general concepts and related terms], St. Petersburg: Professional, 2010, 82 p. (In Russ.)

14. *RMG 115-2019. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya yedinstva izmereniy. Kalibrovka sredstv izmereniy. Algoritmy obrabotki rezul'tatov izmereniy i otsenivaniya neopredelennosti* [RMG 115-2019. State system for ensuring the uniformity of measurements. Calibration of measuring instruments. Algorithms for processing measurement results and estimating uncertainty], Moscow: Standartinform, 2019, 32 p. (In Russ.)

15. Sulaberidze V.Sh., Chunovkina A.G. [On the harmonization of terminology in the RD for assessing and confirming the compliance of means and methods for performing measurements with metrological requirements], *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring technology], 2019, no. 3, pp. 8-12, doi: 10.32446/0368-1025it.2019-3-8-12 (In Russ.)

16. *GOST ISO 9000-2015. Sistemy menedzhmenta kachestva. Osnovnyye polozheniya i slovar'* [GOST ISO 9000-2015. Quality management systems. Basic provisions and dictionary], Moscow: Standartinform, 2019, 48 p. (In Russ.)

17. *RMG 29-2013. Metrologiya. Osnovnyye terminy i opredeleniya* [RMG 29-2013. Metrology. Basic terms and definitions], Moscow: Standartinform, 2015, 71 p. (In Russ.)

18. Sulaberidze V.Sh., Skornyakova Ye.A. [Metrological traceability of reference measurement methods], *Voprosy radioelektroniki* [Problems of radio electronics], 2020, no. 10, pp. 6-12, doi: 10.21778/2218-5453-2020-10-6-12 (In Russ., abstract in Eng.)

Harmonisierung der internationalen und nationalen Formen der Konformitätsbestätigung von Messverfahren

Zusammenfassung: Es sind die Formen der Bewertung und Bestätigung der Erfüllung der Anforderungen an Kalibrierverfahren für Etalons und Messgeräte, Messverfahren und Referenzmessverfahren in der internationalen und nationalen Praxis analysiert. Der Bedarf und Notwendigkeit der maximalen Harmonisierung der Terminologie in diesem Bereich sind nachgewiesen. Es ist ein Diagramm gegeben, das den Zusammenhang der betrachteten Konzepte im Bereich der Bewertung der Konformität von Messverfahren veranschaulicht. Dargestellt sind die Anwendungsbereiche der aktuellen normativen Dokumente zu Mess-, Kalibrier- und Referenzverfahren. Es ist ein hierarchisches metrologisches Rückführbarkeitsschema vorgeschlagen, das Messungen basierend auf Referenzmessverfahren verschiedener Niveaus kombiniert und anhand von Standardproben und Vergleichsproben zertifiziert.

Harmonisation des formulaires internationaux et nationaux de confirmation de la conformité des méthodes de mesure

Résumé: Sont analysées les modalités d'évaluation et de confirmation de la conformité des méthodes d'étalonnage et des instruments de mesure, des méthodes de mesure et des méthodes de mesure de référence dans les pratiques internationales et nationales. Est démontrée la nécessité d'harmoniser au maximum la terminologie dans ce domaine. Est présenté le diagramme illustrant la relation entre les concepts examinés dans le domaine de l'évaluation de la conformité des méthodes d'exécution des mesures. Sont indiqués les domaines des application des formes en vigueur en ce qui concerne les méthodes de mesure, d'étalonnage et les méthodes de référence. Est proposé un schéma de hiérarchie de traçabilité métrologique combinant des mesures basées sur des méthodes de mesure de référence de différents niveaux et certifiées à l'aide d'échantillons standartisés et d'échantillons de comparaison.

Авторы: ***Сулаберидзе Владимир Шалвович*** – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник; ***Неклюдова Анастасия Александровна*** – кандидат технических наук, заместитель руководителя лаборатории, ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева», Санкт-Петербург, Россия.

УДК 631.171
DOI: 10.17277/vestnik.2022.04.pp.596-605

ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА СИСТЕМЫ МИКРОКЛИМАТА НА БАЗЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ATMEGA2560

Н. И. Лебедь[1], К. Е. Токарев[2], Д. Д. Нехорошев[1], М. П. Аксенов[1]

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

Ключевые слова: автоматизация; биотехнология; искусственный микроклимат; микроклональное размножение; микроконтроллеры; растениеводство.

Аннотация: Предложены многосекционная климатическая камера для выращивания растений, позволяющая реализовывать внутри независимых секций различные сочетания микроклимата при соблюдении условий высокой биологической чистоты; система управления терморегуляции, увлажнения воздуха, вентиляции и поддержания биологической чистоты индивидуальной независимой секции на регуляторах закрытой логики. Подобраны исполнительные механизмы системы автоматизации. Разработан программно-аппаратный комплекс системы микроклимата на базе программируемого микроконтроллера ATmega2560. Проведено его моделирование в САПР Proteus 8.10 ISIS. Проведены подбор основных элементов системы управления и тестирование на различных режимах работы, подтвердившее работоспособность и эффективность.

Введение

На сегодняшний момент применение математического моделирования при оптимизации режимных параметров в сельскохозяйственном производстве путем многофакторного эксперимента позволяет, например, эффективно в короткие сроки подобрать значения показателей микроклимата для агро- и биотехнологических способов выращивания растений. Такой подход предусматривает проведение экспериментов в многократной повторности на различных вариантах опытов по нескольким выбранным факторам с тремя уровнями варьирования, что отвечает методикам плана Рехтшафнера, Бокса–Бенкина и др. При этом осуществление данного подхода сложно в исполнении из-за конструктивных особенностей большинства климатических камер, а именно реализации одинаковых условий на всем рабочем объеме, что вынуждает в современных методах исследований применять несколько климатических камер, увеличивая затраты на их приобретение и последующее неэффективное использование.

Осуществление данного подхода осложнено из-за отсутствия возможности создания микроклимата с разными параметрами в рамках одной климатической камеры, поэтому приходится применять параллельно несколько одинаковых модулей, что неминуемо приводит к увеличению как капитальных, так и эксплуата-

ционных затрат (в том числе и за счет вынужденного простоя в период перехода на другую продукцию) и, соответственно, повышению себестоимости конечного продукта. Как видно, заявленный недостаток, в целом затрудняет применение современных климатических камер в пределах структурного подразделения с несколькими разноплановыми направлениями исследований (микробиология, растениеводство, работа с животными и растительными клетками). Кроме этого, недостаток актуален и на производственных предприятиях различной мощности, например, получение экологически чистых растений для производства пищевой продукции при выращивании нескольких групп растений требует создание различных почвенно-климатических условий, что затруднительно с применением современных камер. Существующие зарубежные и отечественные климатические камеры нуждаются в глубокой модернизации и не лишены недостатков, что ограничивает их применение в исследовательских целях.

Объекты и методы исследований

В качестве объекта исследований выбрана разработанная многосекционная климатическая камера для выращивания растений [1, 2]. Устройство включало две независимые друг от друга секции, в которых можно было реализовывать различные параметры микроклимата: тепло/холод, влажность воздуха, яркость и спектр освещения, параметры обеззараживания и вентилирования воздуха. В первом приближении для управления системой микроклимата использовались регуляторы с закрытой логикой (тепло/холод, влажность) и реле времени (вентиляция, обеззараживание воздуха).

На рисунке 1 представлена система управления терморегуляции, увлажнения воздуха, вентиляции и освещения климатической камеры, а также общая компоновка некоторых исполнительных устройств системы.

Указанное устройство обеспечивало проведение необходимых исследований в условиях регулируемого микроклимата при наличии гибкой настройки каждой управляемой зоны, что значительно снижало временные затраты на нахождение оптимальных микроклиматических условий для каждого конкретного образца [3].

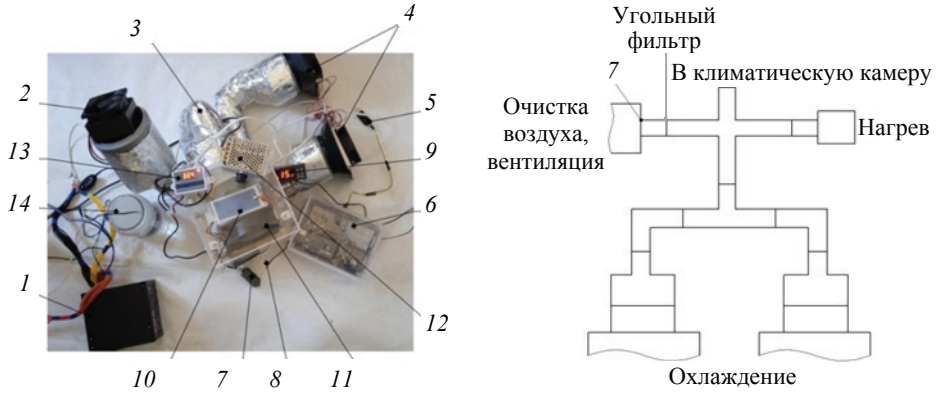


Рис. 1. Система управления терморегуляции, увлажнения воздуха, вентиляции и поддержания биологической чистоты:
1 – блок питания (AC/DC–преобразователь); *2* , *4* – исполнительные устройства соответственно нагрева воздуха и его охлаждения; *3* – трубчатый корпус; *5* – интерфейс связи RS-485 (USB to RS-485 Converter); *6* – блок управления на базе микроконтроллера ATmega2560 (в схеме использовался для управления освещением); *7* – датчик влажности DHT11; *8* – датчик температуры NTC; *9* – дисплей + контроллер терморегуляции; *10* – блок создания и поддержания условий биологической чистоты; *11* – исполнительное устройство вентиляции; *12* – PWM-регулятор озонирования; *13* – дисплей + контроллер увлажнения воздуха; 14 – емкость для испарения жидкости

Обработка поступающего воздуха посредством модуля очистки воздуха в совокупности с полной изоляцией управляемых зон друг от друга и от внешней среды позволяет создать необходимые условия микроклимата в зоне выращивания растений и достичь высокого уровня биологической чистоты, а применение угольного фильтра и блока озонирования воздуха – преобразовать поступающий внутрь управляемых зон выращивания растений озон в обеззараженный от фитопатогенной микрофлоры кислород [4].

В качестве исполнительных устройств подобраны следующие: ТЭН (P = 120 Вт, U = 12 В), модуль охлаждения Пельтье (P = 60 Вт, U = 12 В, 2 шт. на секцию), ультразвуковой увлажнитель воздуха (производительность по увлажнению ≤ 380 мл/ч), светодиодная фитолента длиной 10 м (на две секции, светодиод SMD 5050, P = 12 Вт/м), генератор озона (P = 100 Вт). Исполнительные устройства подобраны с учетом производительности, а также стационарных и нестационарных режимов работы предлагаемой климатической камеры.

Однако данная система имела ряд недостатков – громоздкость, низкая функциональность и отсутствие гибкости, вызванные ограниченным функционалом регуляторов, а также невозможность в дальнейшем приема-передачи данных по последовательным линиям связи и интеграции со SCADA-системами и IoT [5].

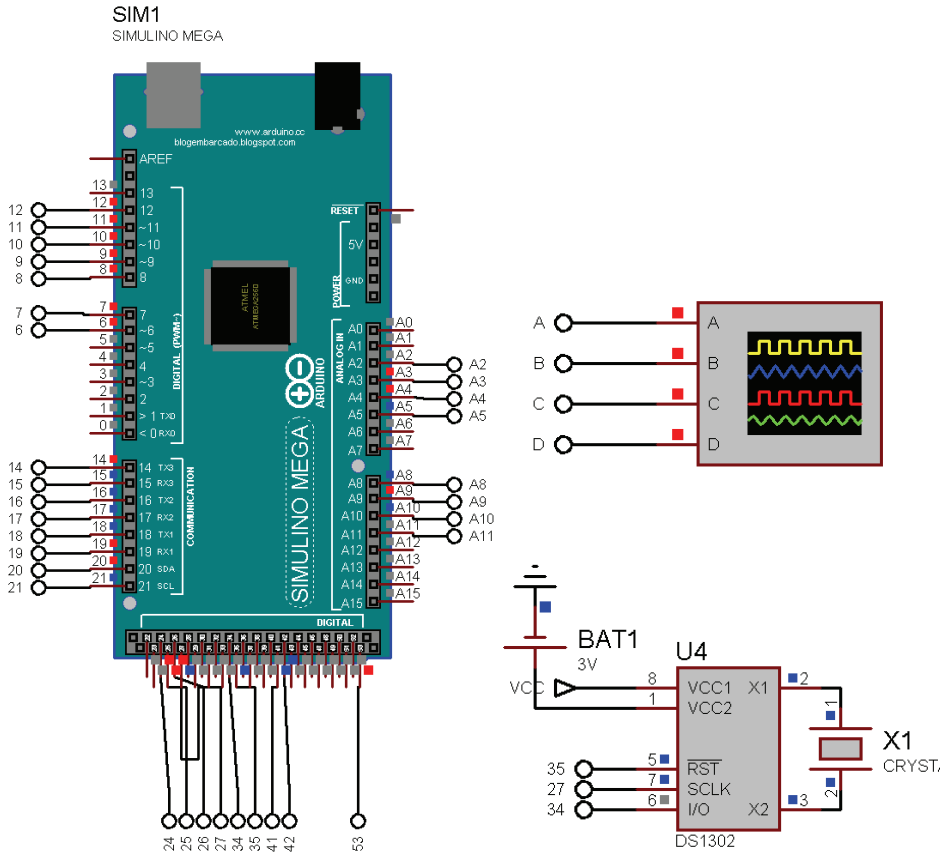
Результаты исследований

Для разработки и моделирования алгоритма управления климатической камерой, использовалась система автоматизированного проектирования электронных устройств Proteus 8.10 ISIS, где производился подбор основных элементов системы управления и их подключение к выбранному микроконтроллеру ATmega2560. Разработка программного кода проекта проводилась в системе графического программирования FLProg на языке FBD, далее осуществлялась проверка кода, преобразование кода на язык C++ и последующая компиляция в Arduino IDE. Полученный файл преобразовывался в бинарный и загружался в среду Proteus 8.10 ISIS с предварительно созданной схемой системы автоматизированного управления для последующей проверки на работоспособность и моделирования [6].

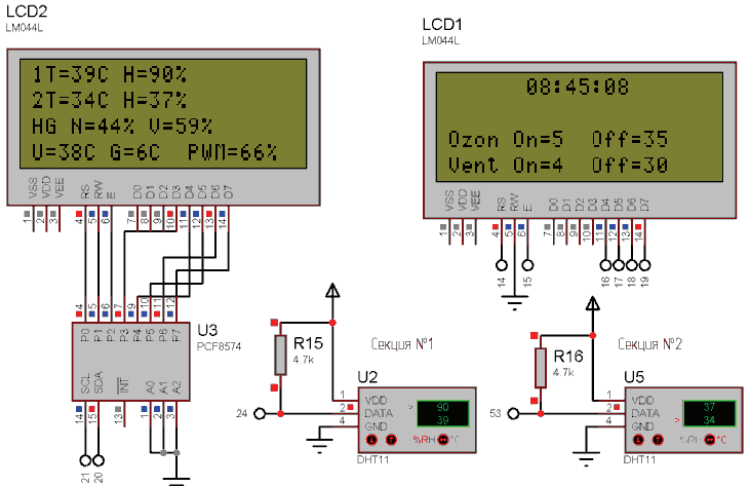
На рисунке 2 представлена модель автоматизированной системы управления в момент симуляции при следующих условиях: $2T < U$ (температура воздуха во второй секции меньше температуры уставок, °C, 34 < 38); $2H < HG$ (влажность воздуха во второй секции меньше уставок влажности, % (37 < 44 – 59), текущее время 8:45:08 (исполнительные механизмы вентилирования и обеззараживания воздуха находятся в активном состоянии и дублируются световой индикацией).

Для управления мощной нагрузкой схемы автоматизации использованы соответствующие элементы: твердотельные и электромеханические реле, силовые ключи (транзисторы) и др. Предлагаемая релейно-транзисторная схема позволят управлять в автоматическом режиме как нагрузкой на включение/отключение исполнительных элементов (увлажнение воздуха, вентиляция, обеззараживание воздуха) (см. рис. 2, *г*, *е*, *ж*), так и в регуляции мощности силовыми ключами по типу коррекции ШИМ-сигнала (терморегуляция) (см. рис. 2, *д*).

Задание уставок для терморегуляции и регуляции влажности воздуха осуществлялись посредством записи нижних и верхних пороговых значений управляемых величин, а также для срабатывания по времени: вентиляция, обеззараживание воздуха по SR-триггеру на включение и отключение с помощью модуля часов реального времени DS1302 (см. рис. 2, *б*). Кроме этого, для вентиляции и обеззараживания воздуха реализовано принудительное включение вне зависимости от времени срабатывания.

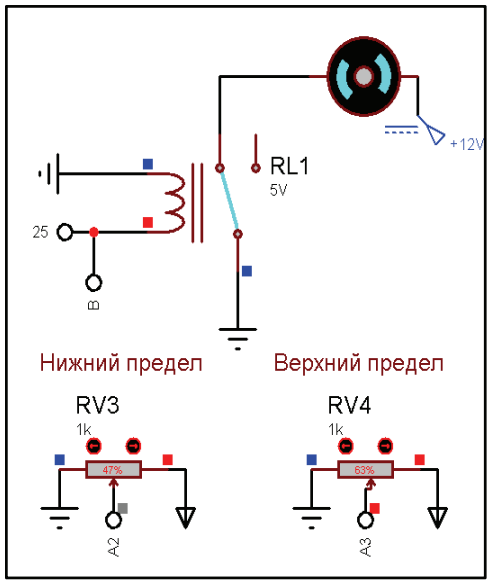


а) *б*)

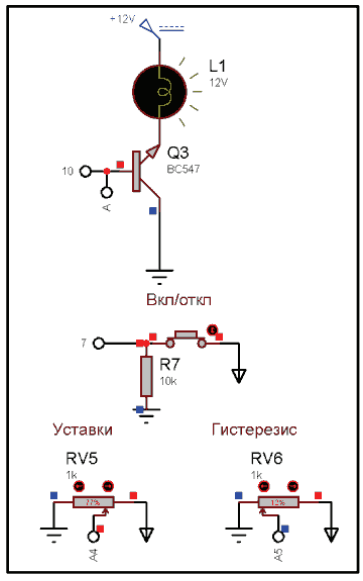


в)

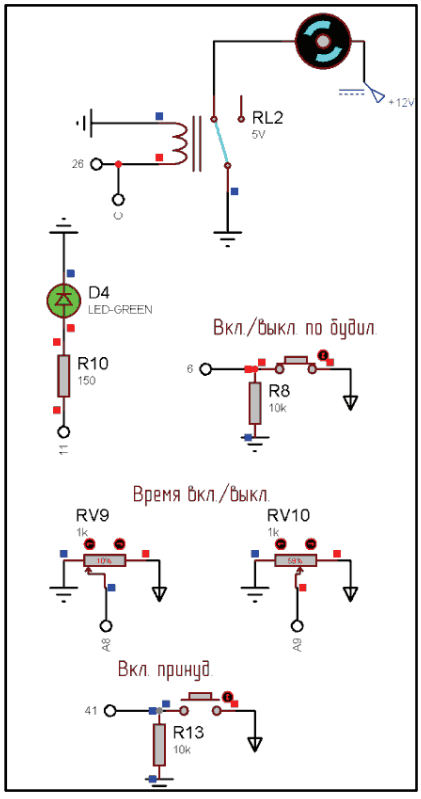
Рис. 2. Моделирование работы схемы при условиях: 2*T* < *U*; 2*H* < *HG*, текущее время 8:45:08 (начало)**:**
а – программируемый микроконтроллер; *б* – осциллограф и часы реального времени DS1302; *в* – дисплей LCD2004 и датчик температуры/влажности DHT11



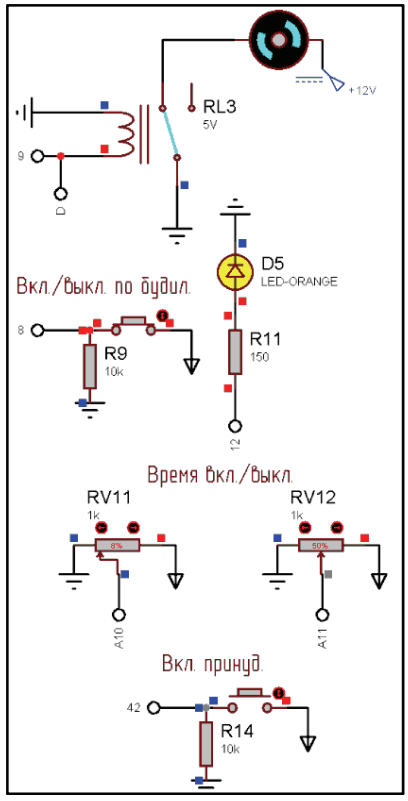
г)



д)



е)



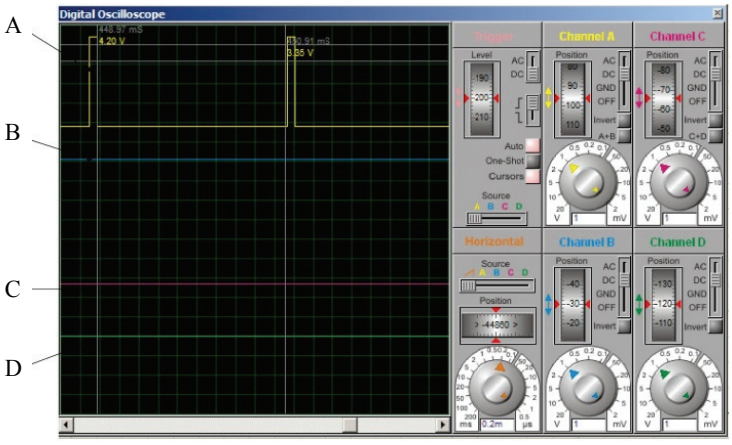
ж)

Рис. 2. Окончание:
г, *д*, *е*, *ж* – модули соответственно увлажнения, терморегуляции, обеззараживания воздуха, вентиляции воздуха

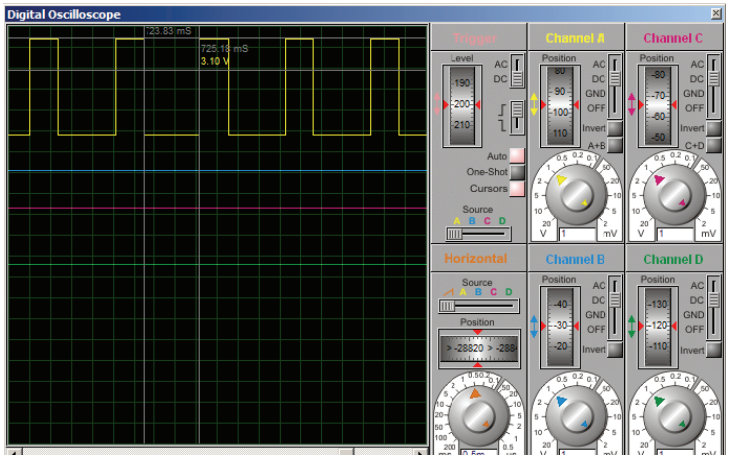
Считывание климатических параметров на каждой секции камеры проводилось посредством датчиков температуры и влажности DHT11. Передача данных от датчиков и индикация данных выводилась на два дисплея LCD2004 (см. рис. 2, *в*).

Второй дисплей отражает: на первой и второй строках – текущие значения температуры, влажности; третьей – установленные нижние и верхние пороговые значения влажности воздуха; четвертой – уставки температуры, гистерезиса и текущее значение ШИМ-сигнала ПИД-регулятора. Первый дисплей: на первой строке – текущее время, на последующих – установленное время срабатывания (в секундах) исполнительных устройств, обеззараживания и вентилирования воздуха.

На рисунке 3 представлена осциллограмма, полученная от Digital Ocilloscope (см. рис. 2, *б*) для четырех каналов: A, B, C, D – соответственно терморегуляции, увлажнения, обеззараживания и вентилирования воздуха.

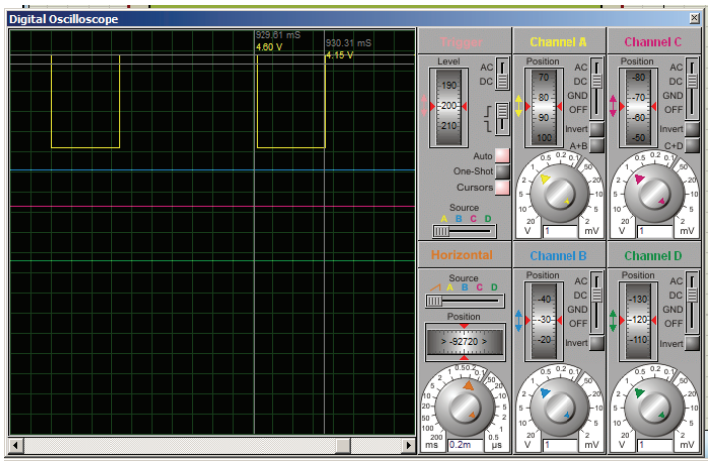


а)



б)

Рис. 3. Осциллограммы, полученные при моделировании системы управления, каналов A, B, C, D на различных режимах работы системы микроклимата (B, C, D включены – режим «логическая единица») (начало):
а, *б* – коэффициенты заполнения ШИМ-сигнала A, %, соответственно 3 и 33



в)

Рис. 3. Окончание:
в – коэффициент заполнения ШИМ-сигнала А – 66 %

Осциллограммам канала А соответствуют следующие значения текущих температур/уставок, °С: 39 / 38 (рис. 3, *а*); 36 / 38; 34 / 38. Как видно, канал А работает в ШИМ-режиме, что соответствует коэффициенту заполнения 3 % (период выключения 1,94 мс, см. рис. 3, *а*), 33 % (период выключения 1,35 мс, рис. 3, *б*), 66 % (период выключения 0,71 мс, рис. 3, *в*) от его максимального значения 255 (8 бит) при использовании функции ПИД-регулирования и транзисторного ключа для реализации терморегуляции. Каналы B, C, D работают в режиме «логический нуль или единица» от электромеханического реле.

Заключение

Применение предлагаемой многосекционной климатической камеры для выращивания растений позволяет реализовывать внутри себя одновременно несколько различных сочетаний климатических факторов (температуры, спектра и интенсивности освещения, уровней концентрации остаточного озона, фильтрации и инфильтрации воздуха и др.), что делает ее незаменимой при проведении моделирования биологических систем и на производстве, где за счет одной единицы оборудования возможно обеспечить одновременной выпуск разноплановой биологической продукции.

Предлагаемая секционная камера для выращивания растений обеспечивает широкий спектр климатических условий, а также их комбинаций внутри одного устройства, технологичности их реализации при произрастании сельскохозяйственных культур в климатической камере и может быть легко реализована в сельскохозяйственном производстве при селекции растений и для других целей.

Для обеспечения работы предлагаемого программно-аппаратного комплекс разработано программное обеспечение, скетч которого занимает 913 строк, использует 22 866 байт (9 %) памяти устройства, всего доступно 253 952 байт, глобальные переменные используют 706 байт (8 %) динамической памяти, оставляя 7486 байт для локальных переменных, максимум: 8192 байт [7]. Проведенное моделирование подтвердило работоспособность устройства с высокой эффективностью на различных режимах работы.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, грант № 22-21-20041.

Список литературы

1. Полезная модель 208958 Российская Федерация, МПК A01G 9/24, A01G 9/26 Секционная климатическая камера для выращивания растений / Н. И. Лебедь, И. В. Волков, А. М. Макаров, Я. В. Калинин, Н. Г. Шаронов, М. Б. Лебедь ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Волгоградский технический университет». – № 2021111261 ; заявл. 21.04.2021 ; опубл. 24.01.2022, Бюл. № 3. – 9 с.
2. Полезная модель 196200 Российская Федерация, МПК A01G 9/24. Климатическая камера для выращивания растений / А. И. Беляев, Ю. Н. Плескачев, Н. И. Лебедь, С. В. Колмукиди, М. Б. Лебедь, Ю. В. Берестнева, А. С. Соломенцева, А. С. Межевова, И. В. Волков, А. М. Пугачева ; заявитель и патентообладатель ФГБУН «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук». – № 2019124638 ; заявл. 31.07.2019 ; опубл. 20.02.2020, Бюл. № 5. – 7 с.
3. Мультисекционная климатическая камера для ускоренного производства культурных растений в условиях регулируемых параметров / Н. И. Лебедь, И. В. Волков, М. Б. Лебедь, Я. В. Калинин // Известия Волгоградского гос. техн. ун-та. – 2021. – № 3 (250). – С. 66 – 68. doi: 10.35211/1990-5297-2021-3-250-66-68
4. Соммер, У. Программирование микроконтроллерных плат Arduino/ Freeduino / У. Соммер. – СПб. : БХВПетербург, 2012. – 256 с.
5. Борисов, И. И. Имитационное моделирование мехатронных систем : учеб.-метод. пособие / И. И. Борисов, С. А. Колюбин. – СПб. : Санкт-Петербургский нац. исслед. ун-т информационных технологий, механики и оптики, 2020. – 103 с.
6. Елизаров, И. А. Технические средства автоматизации. Программно-технические комплексы и контроллеры : учеб.-метод. пособие / И. А. Елизаров, Ю. Ф. Мартемьянов, А. Г. Схиртладзе. – Старый Оскол : ООО «Тонкие наукоемкие технологии», 2021. – 236 с.
7. Свид. о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2022617977. Программный модуль компьютерного мониторинга признаков заражения посевов агрокультур при клональном микроразмножении / Н. И. Лебедь, К. Е. Токарев. М. Б. Лебедь (РФ). – Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ. – 27.04.2022.

Research and Simulation of Operation Modes of Hardware-Software Complex of Microclimate System Based on Programmable Microcontroller ATmega2560

N. I. Lebed[1], K. E. Tokarev[2], D. D. Nekhoroshev[1], M. P. Aksenov[1]

Department of power supply and energy systems (1), nik8872@yandex.ru;
Department of mathematical modeling and informatics (2),
Volgograd State Agrarian University, Volgograd, Russia

Keywords: automation; biotechnology; artificial micro-climate; micropropagation; microcontrollers; crop production.

Abstract: A multi-sectional climatic chamber for growing plants is proposed; it enables to implement various combinations of microclimate within independent sections, subject to conditions of high biological purity; control system for thermoregulation, air humidification, ventilation and maintenance of biological purity of an individual independent section on closed logic controllers. Actuators of

the automation system are selected. A hardware-software complex of a microclimate system based on a programmable microcontroller ATmega2560 has been developed. Its modeling was carried out in CAD Proteus 8.10 ISIS. The selection of the main elements of the control system and testing in various operating modes, which confirmed the operability and efficiency were carried out.

References

1. Lebed' N.I., Volkov I.V., Makarov A.M., Kalinin Ya.V., Sharonov N.G., Lebed' M.B. *Sektsionnaya klimaticheskaya kamera dlya vyrashchivaniya rasteniy* [Sectional climatic chamber for growing plants], Russian Federation, 2022, Utility model 208958. (In Russ.)
2. Belyayev A.I., Pleskachev Yu.N., Lebed' N.I., Kolmukidi S.V., Lebed' M.B., Berestneva Yu.V., Solomentseva A.S., Mezhevova A.S., Volkov I.V., Pugacheva A.M. *Klimaticheskaya kamera dlya vyrashchivaniya rasteniy* [Climatic chamber for growing plants], Russian Federation, 2020, Utility model 196200. (In Russ.)
3. Lebed' N.I., Volkov I.V., Lebed' M.B., Kalinin Ya.V. [Multisectional climate chamber for accelerated production of cultivated plants under conditions of controlled parameters], *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [News of the Volgograd State Technical University], 2021, no. 3 (250), pp. 66-68, doi: 10.35211/1990-5297-2021-3-250-66-68 (In Russ., abstract in Eng.)
4. Sommer U. *Programmirovaniye mikrokontrollernykh plat Arduino/Freeduino* [Programming microcontroller boards Arduino/Freeduino], St. Petersburg: BKHVPeterburg, 2012, 256 p. (In Russ.)
5. Borisov I.I., Kolyubin S.A. *Imitatsionnoye modelirovaniye mekhatronnykh sistem: uchebno-metodicheskoye posobiye* [Simulation modeling of mechatronic systems: teaching aid], St. Petersburg: Sankt-Peterburgskiy natsional'nyy issledovatel'skiy universitet informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki, 2020, 103 p. (In Russ.)
6. Yelizarov I.A., Martem'yanov Yu.F., Skhirtladze A.G. *Tekhnicheskiye sredstva avtomatizatsii. Programmno-tekhnicheskiye kompleksy i kontrollery: uchebno-metodicheskoye posobiye* [Technical means of automation. Software and hardware complexes and controllers: a teaching aid], Stary Oskol: OOO «Tonkiye naukoyemkiye tekhnologii», 2021, 236 p. (In Russ.)
7. Lebed' N.I., Tokarev K.Ye., Lebed' M.B. *Programmnyy modul' komp'yuternogo monitoringa priznakov zarazheniya posevov agrokul'tur pri klonal'nom mikrorazmnozhenii* [Program module for computer monitoring of signs of infection of agricultural crops during clonal micropropagation], Russian Federation, 2022, Certificate of state registration of computer programs No. 2022617977. (In Russ.)

Forschung und Modellierung der Betriebsmodi von Hardware- und Softwarekomplexen der Mikroklimasysteme auf Basis des programmierbaren Mikrocontrollers ATmega2560

Zusammenfassung: Es sind eine mehrteilige Klimakammer für die Pflanzenzucht vorgeschlagen, die es ermöglicht, verschiedene Kombinationen von Mikroklima innerhalb unabhängiger Sektionen unter Bedingungen hoher biologischer Reinheit zu realisieren; Steuersystem für Temperaturregelung, Luftbefeuchtung, Belüftung und Aufrechterhaltung der biologischen Reinheit eines einzelnen unabhängigen Abschnitts auf geschlossenen Logiksteuerungen. Die vollziehenden Mechanismen des Automatisierungssystems sind ausgewählt. Es ist ein Hardware-

Software-Komplex eines Mikroklimasystems basierend auf einem programmierbaren Mikrocontroller ATmega2560 entwickelt. Seine Simulation ist im CAD Proteus 8.10 ISIS durchgeführt. Es sind auch die Auswahl der Hauptelemente des Steuerungssystems und Tests in verschiedenen Betriebsarten durchgeführt, die die Effizienz und Effektivität des Systems bestätigten.

Étude et simulation des modes de fonctionnement du complexe logiciel et matériel du système de microclimat basé sur le microcontrôleur programmable ATmega2560

Résumé: Sont proposés une chambre climatique multi-sections pour la culture de plantes permettant de réaliser différentes combinaisons de microclimats à l'intérieur des sections indépendantes dans des conditions de la haute pureté biologique ainsi qu'un système de contrôle de la thermorégulation, de l'humidification, de la ventilation et du maintien de la pureté biologique d'une section indépendante individuelle sur des régulateurs de logique fermée. Sont proposés les mécanismes du système d'automatisation. Est élaboré le complexe logiciel et matériel du système de microclimat à la base du microcontrôleur programmable ATmega2560. Est réalisée sa modélisation en CAO Proteus 8.10 ISIS. Est effectué le choix des principaux éléments du système de contrôle et les tests sur les différents modes de fonctionnement ce qui a confirmé la capacité de travail et l'efficacité.

Авторы: ***Лебедь Никита Игоревич*** – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение и энергетические системы»; ***Токарев Кирилл Евгеньевич*** **–** кандидат экономических наук, доцент кафедры «Математическое моделирование и информатика»; ***Нехорошев Дмитрий Дмитриевич*** **–** кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение и энергетические системы»; ***Аксенов Михаил Петрович*** **–** кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры «Электроснабжение и энергетические системы», ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет», Волгоград, Россия.

УДК 004.021
DOI: 10.17277/vestnik.2022.04.pp.606-614

АНАЛИЗ ОРГАНИЗАЦИИ СВЯЗИ С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ МАЛОЙ ДАЛЬНОСТИ

В. В. Каштанов, В. А. Немтинов

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

Ключевые слова: архитектура передачи сигналов; беспилотные летательные аппараты малой дальности; организация связи в чрезвычайных ситуациях; ретрансляция сигналов; характеристики каналов связи.

Аннотация: Проведен обзор на применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для ретрансляции. Дано описание базовой сетевой архитектуры и основных характеристик каналов связи. Рассмотрены различные виды передачи данных с помощью БПЛА, подход к организации связи с использованием беспилотных летательных аппаратов – ретрансляторов малой дальности, позволяющий обеспечить информационный обмен в условиях чрезвычайных ситуаций, апробация которого выполнена на примере установления связи между отдельными подразделениями во время проведения учебных мероприятий в горной местности.

Введение

В настоящее время различные службы, обеспечивающие национальную безопасность РФ, проявляют большой интерес к комплексам воздушного наблюдения и мониторинга природной среды и технических объектов с использованием малогабаритных беспилотных летательных аппаратов (**БПЛА**).

Благодаря высокой степени мобильности и низкой себестоимости БПЛА за последние несколько десятилетий нашли широкое применение в различных областях [1]. В первую очередь БПЛА всегда использовались в военной отрасли, выполняя различные задачи на вражеской территории и сокращая потери среди пилотов. С уменьшением стоимости и миниатюризации их компонентов малоразмерные БПЛА (с массой, обычно не превышающей 25 кг) стали доступны для более широкого применения, вследствие чего чаще используются в гражданских и коммерческих целях: мониторинг погоды, обнаружение возгораний в лесах, отслеживание автомобильных пробок, транспортировка грузов, использование в спасательных операциях, ретрансляция сигналов связи и т.д. [2]. Беспилотные летательные аппараты могут быть разделены на две категории: самолетного и вертолетного типа. Каждая из них имеет свои достоинства и недостатки. Например, БПЛА самолетного типа обладают высокой скоростью и способны нести большой вес, однако они должны поддерживать постоянное движение вперед, чтобы сохранять высоту. Как следствие, они не могут быть использованы для ряда задач, таких как тщательный осмотр местности. Беспилотные летательные аппараты вертолетного типа, напротив, обладают ограниченной степенью

Рис. 1. Применение БПЛА для ретрансляции сигнала

мобильности и переносимого веса, но способны осуществлять движение в любом направлении, а также оставаться в одной точке в течение длительного времени. Таким образом, выбор БПЛА зависит от цели применения.

Среди различных областей использования БПЛА их применение в качестве ретрансляторов в системах беспроводной коммуникации является одним из важнейших (рис. 1) [3]. Системы связи, использующие БПЛА, обладают важнейшим преимуществом – в отличие от наземных систем ретрансляции сигналов, их функционирование не может быть затруднено затенением городской или горной местностью или повреждением инфраструктуры связи, вызванным природными катастрофами [4].

Стоит отметить, что помимо использования БПЛА альтернативным решением для обеспечения беспроводной коммуникации является применение иных объектов, таких как, например, воздушные шары. Обычно они функционируют, находясь в стратосфере, что примерно в десятках километров над земной поверхностью. Однако БПЛА (обычно функционирующие на высоте, не превышающей нескольких километров) имеют ряд преимуществ по сравнению с подобными системами и их наземными и спутниковыми аналогами. Во-первых, применение связано с меньшими материальными затратами и более быстрой подготовкой, что делает их подходящим вариантом для кратковременного использования. Кроме того, эксплуатация БПЛА для подобных целей часто обеспечивает прямую видимость объектов связи для БПЛА, что приводит к повышению качества связи.

Высокая степень маневренности подобных аппаратов также отражается на улучшении связи благодаря возможности адаптации к особенностям местности, в которой они действуют. Более того, возможен вариант функционирования БПЛА, при котором качество связи может оказывать влияние на особенности процесса их полета. Например, при наличии стабильной связи с наземными объектами скорость полета аппарата будет уменьшаться, чтобы обеспечить передачу большего количества данных. Благодаря данным преимуществам БПЛА могут стать важнейшим компонентом систем беспроводной коммуникации в будущем.

Области применения

В последнее время БПЛА стали использоваться во многих областях, которые подразумевают применение аппарата в роли ретранслятора: использование в спасательных операциях, тушение лесных пожаров, аэрофотосъемка, охрана территорий, логистика и многие др. Во всех подобных вариантах применения БПЛА выполняют задачи в местах, отдаленных от наземной коммуникационной инфраструктуры, что требует наличия одного или нескольких аппаратов, выполняющих функции ретрансляции.

Использование БПЛА в спасательных и поисковых операциях способно значительно уменьшить время поиска и снизить количество жертв при катастрофах и авариях. Беспилотные летательные аппараты, благодаря их маневренности, скорости и автономности действий, способны выполнять задачи, которые не могут быть выполнены пилотируемыми аппаратами (рис. 2). При наиболее типичном сценарии БПЛА отправляются на заданную территорию, с помощью фото- и других видов съемки собирают данные о количестве обнаруженных жертв, после чего передают их спасательным командам или системам ретрансляции сигналов, в качестве которых может применяться другая группа БПЛА.

Беспилотные летательные аппараты уже доказывали свою эффективность в данном направлении, помогая спасательным командам сузить зону поиска, избежав при этом возможных опасностей. В 2006 году при поиске жертв после урагана «Катрина» два БПЛА были использованы для обнаружения людей, застрявших под завалами.

Еще одним перспективным вариантом использования БПЛА является выполнение различных задач при тушении пожаров. Пожарные службы высоко оценивают потенциал применения БПЛА. По прибытию пожарной команды к месту возгорания БПЛА могут быть использованы для того, чтобы тщательно изучить область пожара, снизив при этом риск для работников пожарной службы. Беспилотные летательные аппараты могут быть оснащены термостойкой камерой, что позволяет обнаружить с их помощью очаги возгорания. Кроме того, такие факторы, как задымленность и слабая видимость, не могут помешать их работе. Также данные аппараты могут использовать фонари и прожекторы для того, чтобы помочь пожарной команде при тушении огня в условиях слабой видимости. После тушения пожара БПЛА способны облегчить оценку ущерба от огня. Помимо этого, БПЛА способны обнаруживать лесные возгорания на ранних стадиях, что облегчает задачу по их тушению. Так, в 2017 году БПЛА был применен пожарной службой Лос-Анджелеса при тушении огромных по площади лесных пожаров, бушевавших вблизи города [5].

При тушении пожаров в отдаленных местах также необходимо применение систем ретрансляции. В условиях отсутствия соответствующей инфраструктуры на земле использование БПЛА для этих целей является наиболее рациональным решением.

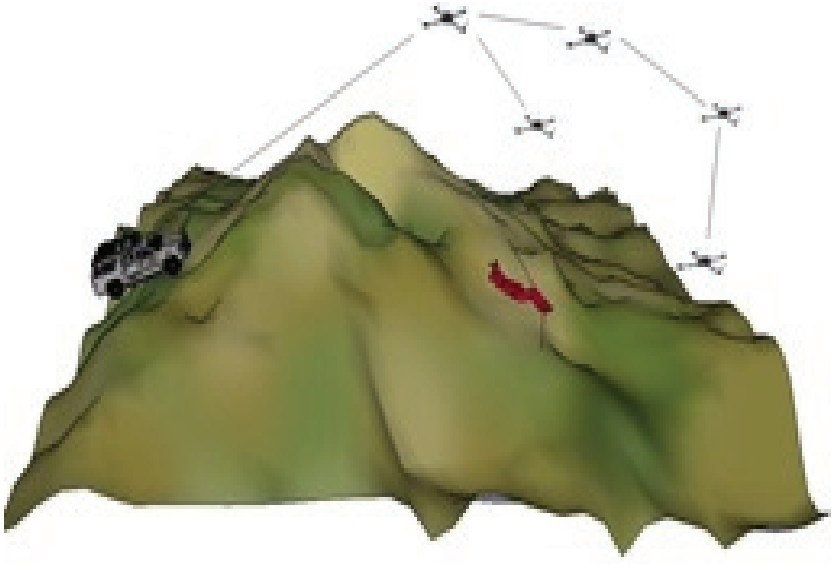


Рис. 2. Применение БПЛА в ходе поисковой операции

Базовая архитектура передачи сигналов

На рисунке 3 показана общая архитектура беспроводной коммуникации с помощью БПЛА, состоящая из двух типов каналов обмена информацией – каналы управления и передачи данных [3].

Канал управления. Данный канал связи необходим для успешного и безопасного функционирования БПЛА. Подобные каналы должны обеспечивать надежную и безопасную двустороннюю передачу информации с низкой задержкой, так как информация, передаваемая с их помощью, критически важна для работы БПЛА. При этом обмен подобной информацией может происходить как между разными БПЛА, так и между БПЛА и наземным пунктом управления. Информация, транслируемая по данному каналу, может быть разделена на 3 основные категории: команды, передаваемые БПЛА с наземных пунктов управления; отчеты о статусе аппарата, отправляемые с борта БПЛА на землю, и информация о препятствиях и опасностях, передаваемая между БПЛА. Каналы управления необходимы даже в случае использования автономных беспилотных летательных аппаратов, способных выполнять работу, используя бортовые компьютеры и не нуждаясь в постоянном контроле со стороны оператора, так как в экстренных случаях все же возникает потребность ручного управления.

Так как информация, передаваемая по каналу управления, является критически важной, она должна транслироваться с помощью защищенных спектров частот. На сегодняшний день используются два частотных диапазона – диапазон L (960…977 МГц) и диапазон C (5030…5091 МГц) [6]. Важно отметить, несмотря на то что БПЛА управляются в первую очередь с наземных пунктов, спутниковые системы также применяются для этой цели, что повышает надежность и качество связи. Еще одним ключевым вопросом является безопасность каналов управления. Отсутствие эффективных механизмов безопасности может привести к так называемому «призрачному управлению» БПЛА – ситуации, при которой управление БПЛА осуществляется неавторизованным оператором. Как следствие, для получения доступа к системам контроля БПЛА необходимы надежные методы аутентификации.

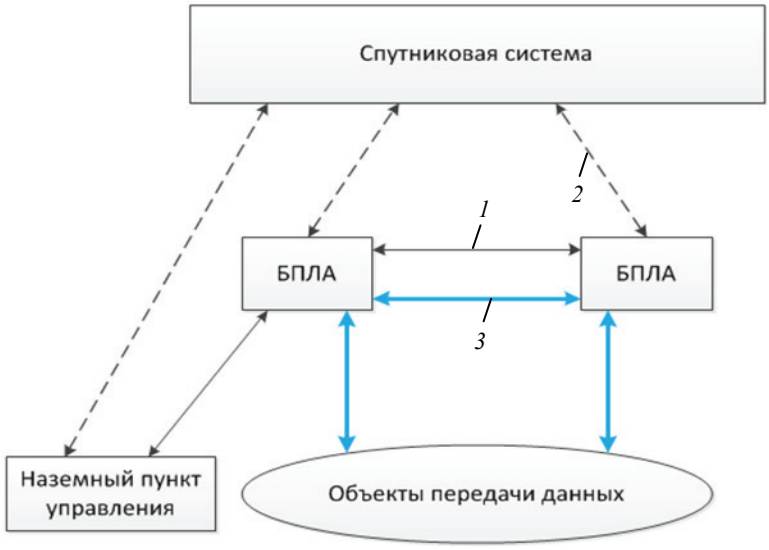


Рис. 3. Общая архитектура коммуникации с помощью БПЛА:
1, *2*, *3* – каналы управления соответственно основной, дополнительный и передачи данных

Канал передачи данных. Данные каналы, напротив, предназначены для передачи информации, связанной с выполняемыми БПЛА задачами. Информация передается наземным терминалам, которыми, в зависимости от задачи, могут быть наземные станции, мобильные терминалы, узлы хранения данных, беспроводные датчики и т.д. Каналы передачи данных должны поддерживать следующие режимы связи: прямая коммуникация между БПЛА и мобильными терминалами, в случаях перегрузки или отказа наземных станций; связь между БПЛА и наземными станциями и между БПЛА и узлами хранения данных, а также связь между двумя БПЛА. Требования к скорости передачи данных зависят от цели и могут варьироваться от нескольких кБ/с для передачи между БПЛА и датчиками до десятков ГБ/с для связи между БПЛА и узлами хранения данных. В сравнении с каналами управления, к каналам передачи данных не предъявляется настолько жесткие требования к возможным задержкам и безопасности передачи. Что касается используемого диапазона частот, он, как правило, зависит от конкретных задач БПЛА. Например, при обеспечении покрытия сотовой связи БПЛА используют частоты диапазона LTE . Однако возможно использование и других диапазонов частот, например, диапазона миллиметровых волн для обеспечения устойчивой связи между двумя БПЛА [7].

Характеристики каналов связи

Для каналов связи характерно наличие двух типов передачи информации: БПЛА–земля и БПЛА–БПЛА. Оба типа обладают характеристиками, выделяющими их на фоне передачи между наземными системами.

Передача типа БПЛА–земля. Данный тип передачи несколько отличается, по сравнению с передачей информации наземным объектам, от пилотируемых летательных аппаратов [6, 8]. В отличие от подобных аппаратов, передающих сигналы наземным пунктам, расположенным на открытой местности и имеющим мощные антенные системы, БПЛА вынуждены осуществлять передачу в районах, где подобная инфраструктура чаще всего отсутствует. Несмотря на преимущество в виде возможности установления прямой видимости с объектами передачи, различные препятствия в виде рельефа местности, зданий или корпуса аппарата могут затруднять передачу. В частности, исследования показывают, что в случае выполнения БПЛА маневров задержка в передаче данных, обусловленная возникновением препятствия в виде корпуса БПЛА, может составлять до десятков секунд, что должно учитываться при планировании задач БПЛА [8]. В случае использования низколетящих БПЛА связь также может быть затруднена по причине преломления, рассеивания и отражения сигнала от гор, земной поверхности, листвы деревьев и т.д. При выполнении БПЛА своих задач над пустыней или морем передачу сигнала затрудняют только отражения от поверхности. При этом возникающие затухания могут быть описаны райсовой моделью затухания, характеризующей воздействие рассеянного компонента сигнала на передачу при наличии прямой видимости между объектами передачи. В зависимости от условий местности, где расположены объекты связи, и используемой частоты, степень воздействия райсовых факторов может варьироваться. Таким образом, отношение между передаваемыми сигналами и их рассеиваемыми компонентами может принимать значение около 15 дБ для диапазона L и 28 дБ для диапазона C при действии БПЛА в холмистой местности [6].

Передача типа БПЛА–БПЛА. При передаче данных между БПЛА объекты передачи чаще всего находятся в прямой видимости. Несмотря на то что отражения сигнала от поверхности могут в некоторой степени вызывать затухание, их

влияние гораздо слабее, чем при передаче БПЛА–земля или при передаче между наземными объектами. Однако в этом случае наблюдается гораздо более сильное влияние доплеровского эффекта, чем при передаче сигнала между БПЛА и наземными объектами, благодаря высоким значениям относительной скорости БПЛА. Данные факторы необходимо учитывать при выборе частотного диапазона для связи между БПЛА. С одной стороны, благодаря почти постоянному наличию прямой видимости между объектами передачи возможно использование миллиметрового диапазона в целях обеспечения устойчивой связи между БПЛА, с другой – при использовании данного диапазона может наблюдаться высокая степень доплеровского сдвига частот, обусловленная большими значениями относительной скорости БПЛА. Благодаря своим особенностям данный вид передачи на сегодняшний день является предметом многих исследований, направленных на поиск эффективных методов его применения.

Адаптация и практическая апробация методов использования БПЛА для ретрансляции сигналов связи

Представленные методы использования БПЛА адаптированы для ретрансляции сигналов связи и были применены в ходе командно-штабных учений, основной целью которых являлась проверка степени готовности руководящего состава и органов военного управления объединенного стратегического командования Южного военного округа, командного состава воинских контингентов, тактических (оперативных) групп к управлению группировками войск (сил), соединениями и подразделениями в ходе совместных операций по локализации и разрешению вооруженных конфликтов, связанных с противодействием терроризму.

Основная часть учений проходила в горной местности. Наличие горного рельефа часто затрудняет использование традиционных схем связи, так как горные структуры обычно являются препятствием на пути радиоволн. В подобных условиях применение для этих целей БПЛА является наиболее рациональным шагом (рис. 4).

В ходе испытаний БПЛА поставленной задачей являлось установление связи с подразделениями по другую сторону горного массива. Попытки установить связь традиционными методами не принесли значимых результатов. Очевидно, что причина была в горных структурах, отражающих и рассеивающих радиоволны. В связи с этим применен низколетящий БПЛА типа DJI Mavic Pro 2 с навесным оборудованием для ретрансляции радиосигналов SURECOM SR-112.

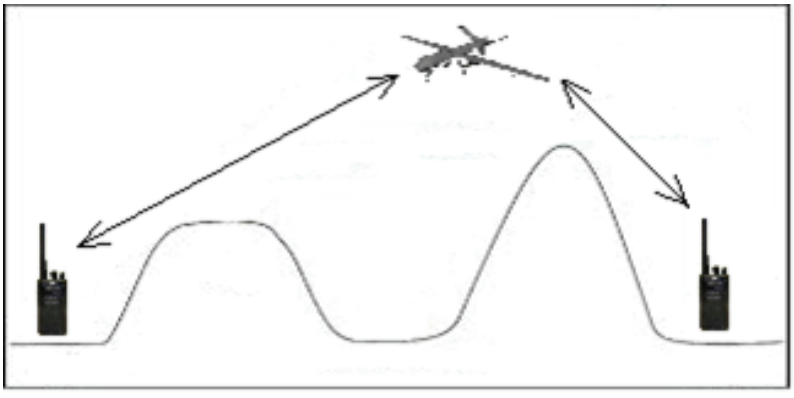


Рис. 4. Использование БПЛА для ретрансляции сигналов в горной местности

Подобный шаг обеспечил успешное выполнение поставленной задачи – между подразделениями по разные стороны горного массива была установлена устойчивая (разборчивость речи составляет 100 %) и стабильная радиосвязь.

Заключение

Проанализированы общие принципы функционирования БПЛА при их применении для мониторинга погоды, обнаружения возгораний в лесах, отслеживания автомобильных пробок, транспортировки грузов, использования в спасательных операциях и т.д. Дано описание преимуществ и недостатков подобного использования БПЛА, общей архитектуры систем коммуникации и место БПЛА в ней, а также общих характеристик каналов связи и видов передачи данных.

Одним из перспективных направлений использования БПЛА является ретрансляция сигналов при передаче данных. Представленные методы использования БПЛА адаптированы для ретрансляции сигналов связи и апробированы при установлении связи между подразделениями во время проведения учебных мероприятий в условиях горной местности. Дальнейшие исследования в данной области способны обеспечить совершенствование систем беспроводной коммуникации и более эффективное использование БПЛА в подобных системах.

Список литературы

1. Valavanis, K. P. Handbook of Unmanned Aerial Vehicles / K. P. Valavanis, G. J. Vachtsevanos. – Springer Netherlands, 2015. – 3022 p.

2. Unmanned Aircraft System (UAS) Service Demand 2015 – 2035: Literature Review & Projections of Future Usage. – Текст : электронный // US Department of Transportation. – 2013. – 151 p. – URL : https://info.publicintelligence.net/USAF-UAS-ServiceDemand.pdf (дата обращения: 31.10.2022).

3. Zeng, Y. Wireless Communications with Unmanned Aerial Vehicles: Opportunities and Challenges / Y. Zeng, R. Zhang, T. J. Lim // IEEE Communications Magazine. – 2016. – Vol. 54, No. 5. – P. 36 – 42. doi: 10.1109/MCOM.2016.7470933

4. Merwaday, A. UAV Assisted Heterogeneous Networks for Public Safety Communications / A. Merwaday, I. Guvenc // Proceedings IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops, 09 – 12 March 2015, New Orleans, LA, USA. – IEEE, 2015. – P. 329 – 334. doi: 10.1109/WCNCW.2015.7122576

5. Vimalkular, R. Design and Development of Heavy Drone for Fire Fighting Operation / R. Vimalkular, K. K. Shaw // International Journal of Engineering and Technical Research. – 2020. – Vol. 9, No. 6. – P. 572 – 576. doi: 10.17577/IJERTV9IS060433

6. Matolak, D. W. Unmanned Aircraft Systems: Air-Ground Channel Characterization for Future Applications / D. W. Matolak, R. Sun // IEEE Vehicular Technology Magazine. – 2015. – Vol. 10, No. 2. – P. 79 – 85. doi: 10.1109/MVT.2015.2411191

7. Millimeter Wave Wireless Communications / T. S. Rappaport, R. C. Heath, J. Daniels, J. N. Murdock. – Prentice Hall, 2014. – 704 p.

8. Sun, R. Initial Results for Airframe Shadowing in L- and C-band Air-Ground Channels / R. Sun, D. W. Matolak // Proceedings Integrated Communication, Navigation and Surveillance Conference, 21 – 23 April 2015, Herdon, VA, USA. – IEEE, 2015. – P. 1 – 8. doi: 10.1109/ICNSURV.2015.7121271

The Analysis of the Organization of Communication Using Small-Range Unmanned Aerial Vehicles

V. V. Kashtanov, V. A. Nemtinov

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

Keywords: architecture of signal transmission; short-range unmanned aerial vehicles; organization of communication in emergency situations; signal relaying; characteristics of communication channels.

Abstract: A review was made on the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for relaying. The description of the basic network architecture and the main characteristics of communication channels are given. Various types of data transmission using UAVs and an approach to organizing communication using unmanned aerial vehicles - short-range repeaters, which allow for information exchange in emergency situations, the approbation of which was carried out through the example of establishing communication with between individual units during training events under conditions mountainous area are considered.

References

1. Valavanis K.P., Vachtsevanos G.J. *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*, Springer Netherlands, 2015, 3022 p.
2. https://info.publicintelligence.net/USAF-UAS-ServiceDemand.pdf (accessed 31 October 2022).
3. Zeng Y., Zhang R., Lim T. J. Wireless Communications with Unmanned Aerial Vehicles: Opportunities and Challenges, *IEEE Communications Magazine*, 2016, vol. 54, no. 5, pp. 36-42, doi: 10.1109/MCOM.2016.7470933
4. Merwaday A., Guvenc I. UAV Assisted Heterogeneous Networks for Public Safety Communications, Proceedings IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops, 09 - 12 March 2015, New Orleans, LA, USA, IEEE, 2015, pp. 329-334, doi: 10.1109/WCNCW.2015.7122576
5. Vimalkular R., Shaw K.K. Design and Development of Heavy Drone for Fire Fighting Operation, *International Journal of Engineering and Technical Research*, 2020, vol. 9, no. 6, pp. 572-576, doi: 10.17577/IJERTV9IS060433
6. Matolak D.W., Sun R. Unmanned Aircraft Systems: Air-Ground Channel Characterization for Future Applications, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2015, vol. 10, no. 2, pp. 79-85, doi: 10.1109/MVT.2015.2411191
7. Rappaport T.S., Heath R.C., Daniels J., Murdock J.N. *Millimeter Wave Wireless Communications*, Prentice Hall, 2014, 704 p.
8. Sun R., Matolak D.W. Initial Results for Airframe Shadowing in L- and C-band Air-Ground Channels, Proceedings Integrated Communication, Navigation and Surveillance Conference, 21 - 23 April 2015, Herdon, VA, USA, IEEE, 2015, pp. 1-8, doi: 10.1109/ICNSURV.2015.7121271

Analyse der Organisation der Kommunikation bei der Verwendung von unbemannten Luftfahrzeugen der kurzen Reichweite

Zusammenfassung: Es ist eine Überprüfung der Verwendung von unbemannten Luftfahrzeugen (UAVs) für die Weiterleitung vorgenommen. Die Beschreibung der grundlegenden Netzwerkarchitektur und der Hauptmerkmale

von Kommunikationskanälen ist gegeben. Es sind verschiedene Arten der Datenübertragung mit UAVs untersucht, der Ansatz zur Organisation der Kommunikation mit unbemannten Luftfahrzeugen – Kurzstrecken-Repeatern, der den Informationsaustausch in Notfallsituationen ermöglicht, dessen Bewährung am Beispiel des Aufbaus der Kommunikation zwischen einzelnen Einheiten bei Trainingsveranstaltungen unter Bergbedingungen getestet worden ist.

Analyse des communications avec les drones de courte portée

Résumé: Est exécuté un examen de l'utilisation des véhicules aériens sans pilote (VASP) pour la retransmission. Est donnée une description de l'architecture du réseau de base et des caractéristiques de base des canaux de communication. Sont examinés les différents types de transmission des données par VASP, l'approche envers l'organisation de la communication avec l'utilisation des véhicules aériens sans pilote-répéteurs à courte portée, permettant l'échange d'informations dans les situations d'urgence, dont l'approbation a été testée à l'exemple de l'établissement des liens avec des unités individuelles lors des activités de formation dans des conditions de terrain montagneux.

Авторы: ***Каштанов Вячеслав Вячеславович*** – магистрант; ***Немтинов Владимир Алексеевич*** – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

УДК 66.022.54
DOI: 10.17277/vestnik.2022.04.pp.615-627

АНАЛИЗ СМЕШЕНИЯ ТВЕРДОГО ДИСПЕРСНОГО ПОЛИМЕРНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ КИБЕР-ФИЗИЧЕСКОЙ ПОДДЕРЖКИ РЕЦИКЛИНГА

Д. В. Стенько[1], А. Б. Капранова[1], Д. Д. Бахаева[2], Д. В. Федорова[1], А. Е. Лебедев[3]

Кафедры: «Теоретическая и прикладная механика» (1), kapranova_anna@mail.ru, «Информационные системы и технологии» (2), «Технологические машины и оборудование» (3), ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Ярославль, Россия

Ключевые слова: вторичное сырье; модель; параметры; процесс; рециклинг; смешение; твердая дисперсная смесь; упругие лопатки.

Аннотация: В рамках стохастического подхода к моделированию процесса получения дисперсной смеси с вторичным сырьем в рабочем объеме ротационного устройства выполнен анализ наиболее значимых факторов повышения эффективности операции смешения полимерных компонентов. При этом использован энергетический метод моделирования механизма поведения смешиваемых несферических частиц в разреженных потоках, образуемых двухрядными упругими лопастями, касательными к смесительному барабану. Проведен анализ, учитывающий соответствующие наборы конструктивных и режимных параметров ротационного смесителя, предназначенного для предварительной подготовки работы инжекционно-литьевой машины.

Введение

Проблема совершенствования кибер-физической поддержки процесса рециклинга в рамках развития цифровых технологий, в том числе на различных этапах 3D-печати, отвечает запросам современного энергоэффективного подхода к вопросам экологии и энергосбережения. Развитие технологий практической реализации процесса 3D-печати в направлении привлечения полимерного вторичного сырья является актуальной проблемой и требует решения ряда задач, относящихся к подготовительным этапам данной операции [1]. Заметим, что использование вторичных продуктов повышает требования к организации самого процесса 3D-печати вследствие необходимости соблюдения тестов не только на стойкость

цвета готового продукта, но и на его прочностные характеристики в различных условиях эксплуатации. К таким дополнительным факторам можно отнести показатели термостойкости, морозоустойчивости. Перепады температурного параметра или его многократные циклические нагрузки не должны отражаться на регламентном эффекте сохранения устойчивости и надежности конструкции, получаемой на 3D-печати. Решение данных задач существенно облегчается с привлечением кибер-физического подходак вопросам поддержки процесса рециклинга, когда требуется учет множества наборов параметров для организации эффективного процесса получения качественного продукта 3D-печати [2].

Одна из нескольких известных схем практической реализации рециклинга в данной области цифровых технологий предполагает применение двухкомпонентной полимерной дисперсной смеси, состоящей из вторичного и первичного сыпучих материалов [3]. Пропорциональное содержание данных твердых дисперсных материалов в составе смеси контролируется регламентом заказчика и обычно соответствует соотношению 1:9 при заданном гранулометрическом составе.

Проблема достижения заданных требований к однородности [4 – 6] указанной полимерной дисперсной смеси может быть решена в рабочем объеме ротационного смесителя [7] на этапе предварительной подготовки [8] работы инжекционно-литьевой машины.

Целью настоящей работы является анализ наиболее значимых факторов повышения эффективности операции смешения полимерных компонентов при формировании их разреженных потоков. Последние образованы с помощью двухрядных упругих лопастей, установленных касательно к поверхностям двух смесительных цилиндрических барабанов в рабочем объеме ротационного смесителя инжекционно-литьевой машины [8].

Освобождение проектируемого процесса смешения полимерных компонентов от негативного влияния последствий сегрегации [9] представляет собой одну из основных задач разработки нового смесительного оборудования ротационного типа. Выделение наборов параметров данного механического процесса по различным признакам (конструктивным, режимным, физико-механическим) и их учет согласно системно-структурному анализу на каждом этапе проектирования носит определяющий характер [10, 11]. При этом в качестве методологической основы моделирования процесса получения двухкомпонентной полимерной дисперсной смеси, состоящей из вторичного и первичного сыпучих материалов, использован стохастический подход в форме энергетического метода Ю. Л. Климонтовича [12]. Указанный энергетический метод апробирован авторами на примерах моделирования формирования разреженных потоков сыпучих компонентов щеточными гибкими элементами различных видов [4 – 6] и упругими лопастями [7].

Особенности ротационного способа смешения твердого дисперсного полимерного сырья

Согласно предложенному в работе [8] механическому способу, формирование разреженных потоков полимерных дисперсных компонентов происходит в рабочем объеме ротационного смесителя на двух стадиях его эксплуатации (рис. 1).

Первая стадия относится к получению скрещивающихся потоков вторичного и первичного полимерных сыпучих материалов после их вертикальной загрузки-дозирования в зазоры двух барабанов с трехрядными упругими лопастями, установленными касательно к их цилиндрическим поверхностям (рис. 2). Вторая стадия смешения служит для усиления эффективности проектируемого процесса за счет работы отбойных конических поверхностей.

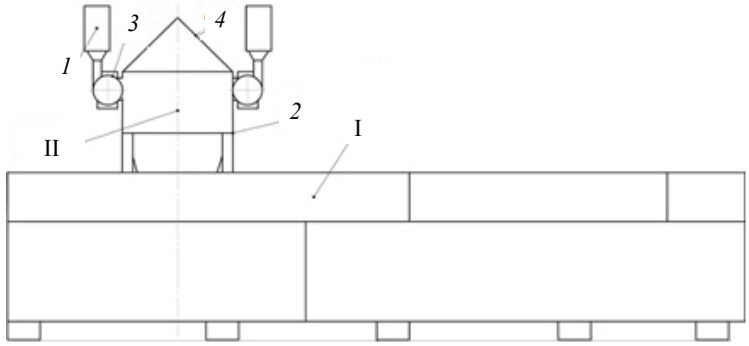


Рис. 1. Условная схема установки ротационного смесителя вторичного и первичного полимерных сыпучих материалов на инжекционно-литьевой машине 1500-475:
I – инжекционно-литьевая машина; II – ротационный смеситель; *1* – бункер-дозатор; *2* – корпус смесителя; *3* – кожух смесительного барабана; *4* – конический отбойник

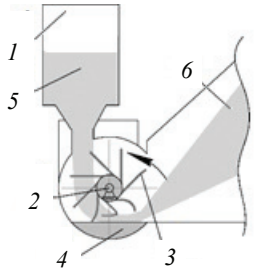


Рис. 2. Условная схема реализации первой стадии смешения полимерных сыпучих материалов в ротационном смесителе:
1 – бункер-дозатор; *2* – смесительный барабан; *3* – упругие лопатки; *4* – неподвижная поверхность; *5* – дисперсный компонент; *6* – разреженный поток

В настоящей работе акцентируется внимание на первой стадии (см. рис. 2) процесса смешения полимерных сыпучих материалов в рабочем объеме ротационного смесителя [8] на этапе предварительной подготовки работы инжекционно-литьевой машины (см. рис. 1). Решение проблемы кибер-физической поддержки рециклинга при получении дисперсной полимерной смеси в присутствии вторичного компонента тесно связано с вопросом выбора параметров процесса смешения, как предварительного этапа работы инжекционно-литьевой машины.

Описание информационных переменных

$$z(t)=\{z_v(t)\}=\{x(t),\, y(t),\, a_{i,\,ki}=\text{const},\, b_{i,\,li}=\text{const}\},\ \ v=\overline{1,\, s_0}, \tag{1}$$

моделируемого процесса смешения полимерных материалов выполняется с помощью наборов параметров: входных $x(t)\equiv\{x_{i,\,mi}(t)\},\ m_i=\overline{1,\, s_{1\,l}}$; выходных $y(t)\equiv\{y_n(t)\},\ \ n=\overline{1,\, s_2}$; конструктивных $a\equiv\{a_1,\, a_2\}=\{a_{i,\,ki}=\text{const}\},\ k_i=\overline{1,\, s_{3l}}$; режимных $b\equiv\{b_1,\, b_2\}=\{b_{i,\,li}=\text{const}\},\ l_i=\overline{1,\, s_{4l}}$.

Указанные наборы задаются выражениями:

$$\{x_{i,\,mi}(t)\}=\{Q_{Vi},\, C_{Vi}\},\ \ \{y_{i,\,ni}(t)\}=\{x_{i,\,mi}(t),\ V_C^{reg},\, \Delta V_C\}, \tag{2}$$

$$\{a_{1,\,k1}\}=\{r_{ci},\, s_{ci},\, D_{wi},\, l_{bi},\, h_{bi},\, \eta_{bi},\, \varphi_i,\, u_{ri},\, u_{si}\},\ \ \{a_{2,\,k2}\}=\{\gamma_{bs}\ ,\ L_{bs}\}; \tag{3}$$

$$\left\{ b_{i,\,li} \right\} = \left\{ \omega_i, h_{Li}, h_{0i} \right\}, \quad q = \left\{ \rho_i, \overline{d}_l, k_f, k_u \right\}. \tag{4}$$

В выражение (2) входят: Q_{Vi} – объемный расход полимерного компонента $i = \overline{1, 2}$; C_{Vi} – объемные доли указанных компонентов; $V_C^{reg}, \Delta V_C$ – регламентные значения коэффициента неоднородности и его абсолютной погрешности для готовой дисперсной полимерной смеси.

Выражение (3) содержит следующие обозначения, относящиеся к наборам конструктивных параметров $\{a_{1,\,k1}\}$, $\{a_{2,\,k2}\}$ для двух этапов процесса смешения полимерных компонентов, согласно рис. 1, 2:

– для цилиндрических барабанов, обеспечивающих образование разреженного потока полимерного компонента $i = \overline{1, 2}$ (s_{ci} – длина, r_{ci} – радиус);

– корпусов указанных барабанов (D_{wi} – диаметр);

– упругих прямоугольных лопаток, установленных касательно к цилиндрическим поверхностям барабанов (l_{bi} – длина, h_{bi} – высота, η_{bi} – ширина, φ_i – угол смещения при закреплении, u_{ri} – число рядов, u_{si} – число в одном ряду);

– конической отбойной поверхности (γ_{bs} – угол раствора, L_{bs} – длина образующей).

Набор режимных параметров $\{b_{i,\,li}\}$ из выражения (4) для данной технологической операции включает: ω_i – угловые скорости вращения смесительных барабанов при образовании разреженного потока компонента $i = \overline{1, 2}$; h_{Li} – полная высота слоя компонента $i = \overline{1, 2}$ на входе в зазор между барабаном и неподвижной опорной поверхностью; h_{0i} – высота данного зазора.

Таким образом, согласно выражениям (1) – (3) общее число информационных переменных изучаемой технологической операции соответствует s_0 = 36. Последнее значение s_0 указывает на актуальность проблемы кибер-физической поддержки рециклинга в процессе подготовки полимерной смеси с вторичным компонентом полипропилена для эффективной работы инжекционно-литьевой машины (см. рис. 1).

При этом дополнительным набором параметров модели смешения является множество $q = \left\{ \rho_i, \overline{d}_l, k_f, k_u \right\}$ из (4), относящееся к характеристикам физико-механических свойств веществ смешиваемых полимерных дисперсных сред и упругих лопастей. Здесь приведены обозначения: ρ_i – истинная плотность полимерного компонента $i = \overline{1, 2}$; $\overline{d}_l$ – усредненный по фракциям диаметр частиц данного компонента; k_f – коэффициент формы; k_u – угловой коэффициент жесткости упругой лопатки.

Одной из основных задач моделирования процесса смешения полимерных материалов в ротационном аппарате является установление из набора информационных параметров $\{z_v(t)\}$ или оптимальных значений оптимизируемых параметров, или пределов их изменения с позиций рационального протекания указанной технологической операции. Управление изучаемым процессом становится возможным при формулировании критерия обратной связи между информационными параметрами $\{z_v(t)\}$. В частности, критериальным показателем в данном случае может выступать коэффициент неоднородности полимерной дисперсной смеси V_C при заданных требуемых его значениях V_C^{reg} из набора (2) для выходных параметров изучаемой технологической операции $\{y_{i,\,ni}(t)\}$. Авторами апро-

бированы модели движения частиц дисперсных материалов в разреженных потоках, образованных упругими лопастями, установленными касательно к цилиндрическим поверхностям барабана, при различных значениях конструктивного параметра u_{ri} из набора $\{a_{1,\,k1}\}$ согласно (3). В частности, при $u_{ri} = 1$ наблюдается однорядный случай крепления лопастей [2, 7]; при $u_{ri} = 2$ – двухрядный; при $u_{ri} = 3$ – трехрядный [13, 14] и т.д. В настоящей работе рассмотрен второй случай ($u_{ri} = 2$).

Описание ротационного смешения твердого дисперсного полимерного сырья

К особенностям предлагаемой модели смешения полимерных дисперсных материалов относится отличная от сферической форма частиц полипропилена как вторичного, так и первичного компонентов. Согласно (4) набор $q = \left\{ \rho_i, \overline{d}_l, k_u \right\}$ включает усредненный по фракциям диаметр частиц данного компонента

$$\overline{d}_l = \sum\nolimits_{t=1}^{n_t} \overline{d_{fit}} \big/ n_t \,, \tag{5}$$

где $\overline{d_{fit}}$ – усредненный диаметр частицы во фракции $t = \overline{1, n_t}$.

Введение коэффициента формы k_f при расчете объема одиночных частиц компонентов позволят количественно учесть их несферичность. Кроме того, предполагаемое стохастическое моделирование для поведения макросистем частиц смешиваемых полимерных компонентов проводится вне макромасштабных флуктуаций состояний указанных макросистем. Данный факт отражается на допущении об отсутствии столкновений частиц во время их разбрасывания упругими лопатками, находящимися на разных рядах $j = \overline{1, 2}$ одного барабана $i = \overline{1, 2}$. Учитывая принимаемые допущения, построение искомого распределения числа частиц каждого полимерного компонента выполняется в рамках случайного процесса А. А. Маркова, как однородного и стационарного.

Пусть выбор элементарного фазового объема

$$d\tau_{ij} = dv_{xij} dv_{yij} = -\omega_i^2 r_{ij} dr_{ij} d\theta_{ij}, \tag{6}$$

определяется фазовыми переменными в виде составляющих скорости центра масс частицы $\left(v_{xij};\ v_{yij}\right)$ компонента $i = \overline{1, 2}$ при взаимодействии с лопаткой ряда $j = \overline{1, 2}$. Тогда, согласно стационарному решению кинетического уравнения Фоккера–Планка в форме

$$\phi_i = a_{ij} \exp\left(-E_{ij} \big/ E_{0ij}\right), \tag{7}$$

при указанном выборе $d\tau_{ij}$ из (6), имеем следующую экспоненциальную зависимость для уменьшения числа частиц dN_{ij} в данном элементарном объеме и уравнение нормировки для коэффициента a_{ij}:

$$dN_{ij} = a_{ij} \exp\left(-E_{ij} \big/ E_{0ij}\right) d\tau_{ij}\ ; \tag{8}$$

$$\int_{\tau_{ij}} a_{ij} \exp\left(-E_{ij} \big/ E_{0ij}\right) d\tau_{ij} = 1\,. \tag{9}$$

Выражения (8), (9) содержат энергию стохастического движения E_{ij} для частицы компонента $i = \overline{1, 2}$ при работе двухрядных упругих лопастей $j = \overline{1, 2}$ и параметр E_{0ij}, как значение этой энергии в момент стохастизации макросистем час-

тиц полимерных компонентов. Параметр E_{0ij} в выражениях (8), (9) задается уравнением энергетического баланса. Здесь зависимость

$$E_{ij}\left(r_{ij}, \theta_{ij}\right) = \sum\nolimits_{v=1}^{3} E_{ijv}\left(r_{ij}, \theta_{ij}\right), \tag{10}$$

от фазовых переменных в разных интерпретациях, например, $\left(v_{xij};\ v_{yij}\right)$ или $\left(r_{xij};\ \theta_{ij}\right)$, определяется связью между скоростью центра масс частицы в полярных координатах $v_{r\theta ij}$ и координатами точек $D_{ij}\left(r_{D_{ij}}; \theta_{D_{ij}}\right)$ деформируемых лопаток на концах их проекций в поперечной плоскости барабана. Явный вид зависимости $E_{ij}\left(r_{ij};\ \theta_{ij}\right)$ не приводится вследствие громоздкости.

Используется способ описания движения лопатки, деформированной в зазоре между барабаном и неподвижной поверхностью (рис. 2), с помощью уравнения спирали Архимеда

$$r_{SAij}\left(\theta_{ij}\right) = \mu_{0i} + \mu_{1i}\theta_{ij}, \tag{11}$$

в полярной системе координат (r_{ij}, θ_{ij}), предложенного авторами [7, 8], где μ_{0i}, μ_{1i} – коэффициенты, определяемые геометрией узла «барабан–лопасти». При этом положение для концов проекций лопастей на поперечную плоскость барабана определяется уравнением $r_{Dij}(\theta_{ij})$ для движения точки D_{ij}, соответствующей указанной кривой Архимеда $r_{SAij}\left(\theta_{ij}\right)$ из (11), через конструктивные параметры рабочего объема смесителя $\{a_{1,k1}\}$ из выражения (3).

Учитывая равенство между энергией частиц массой m_{ij} для макросистем полимерных компонентов $i = \overline{1, 2}$ при захвате двухрядными упругими лопастями $j = \overline{1, 2}$ в зазоре барабан – неподвижная поверхность и при разбрасывании лопастями имеем

$$\sum\nolimits_{j=1}^{2} N_{ij} m_{ij} \left\{ h_{0i}^{2}/2 + \beta_{0i}^{-1} \int\nolimits_{0}^{\beta_{0i}} \left[r_{Dij}\left(\theta_{ij}\right)\right]^{4} / \left[K_{ij}\left(\theta_{ij}\right)\right] d\theta_{ij} \right\} +$$

$$+ \sum\nolimits_{j=1}^{2} a_{ij} \int\nolimits_{\gamma_{0ij}}^{\gamma_{1ij}} d\theta_{ij} \int\nolimits_{\mu_{0i}}^{r_{Dij}\left(\theta_{ij}\right)} E_{ij} \exp\left(-E_{ij}/E_{0ij}\right) r_{ij} dr_{ij} = 0, \tag{12}$$

где

$$K_{ij}\left(\theta_{ij}\right) = \left[U_{1ij}\left(\theta_{ij}\right)\right]^{2} + u_{20ij}^{2}\ ;\ U_{1ij}\left(\theta_{ij}\right) = u_{0ij} + u_{1ij}\theta_{ij}\ ; \tag{13}$$

$$u_{0ij} = \cos\left[\psi_i\left(\theta_{ij}\right)/2\right];\quad u_{1ij} = \left\{\mu_{1i}^{2} / \left[2\left(\mu_{0i}^{2} + \mu_{1i}^{2}\right)\right]\right\} \sin\left[\psi_i\left(\theta_{ij}\right)/2\right], \tag{14}$$

$$u_{20ij} = \left[u_{0ij}\left(1 - u_{0ij}\right)\right]^{1/2}. \tag{15}$$

при значениях γ_{0ij} и γ_{1ij}, соответствующих $\gamma_{\delta i}$.

Итак, выражение (8) с учетом нормировки (9) и значения параметра E_{0ij} из (12) согласно (13) – (15) определяет вид двух дифференциальных распределений числа частиц полимерных компонентов $i = \overline{1, 2}$ по углу разбрасывания θ_{ij}:

– функции $g_{ij}(\theta_{ij})$ после работы упругих лопастей ряда $j = \overline{1, 2}$ в зазоре барабан–неподвижная поверхность

$$g_{ij}\left(\theta_{ij}\right) = \left(1/N_{ij}\right) dN_{ij}/d\theta_{ij}\ ; \tag{16}$$

– полной функции $G_i(\theta_{ij})$ после работы двухрядных лопастей

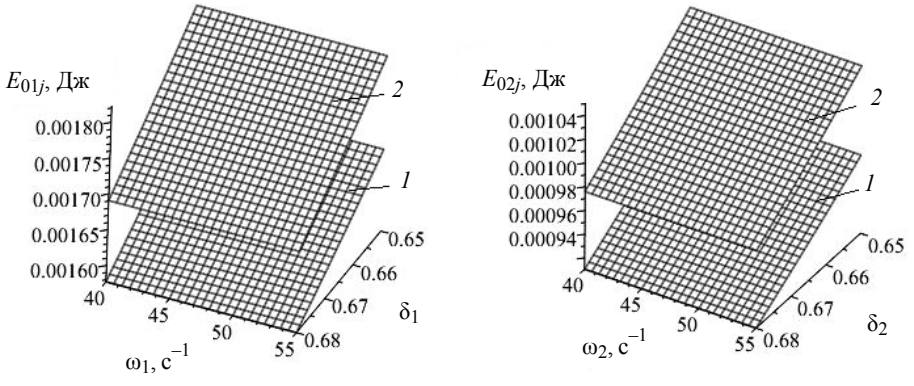
$$G_i\left(\theta_{ij}\right)=\prod_{j=1}^{2} g_{ij}\left(\theta_{ij}\right). \qquad (17)$$

Основные результаты моделирования процесса смешения твердого дисперсного полимерного сырья

Рассмотрим пример расчета искомых характеристик для процесса получения двухкомпонентной полимерной дисперсной смеси, состоящей из вторичного (i = 1; $\rho_1 = 0{,}91\cdot10^3$ кг/м^3; $\overline{d_1} = 5{,}490\cdot10^{-3}$ м; $k_f = 0{,}28$) и первичного(i = 2; $\rho_2 = 0{,}93\cdot10^3$ кг/м^3; $\overline{d_2} = 4{,}435\cdot10^{-3}$ м; $k_f = 0{,}30$) полипропилена ГОСТ 29996-86. Согласно описанным наборам $\{a_{1,\,k1}\}$, $\{b_{i,\,li}\}$ из (3), (4) уточним соответствующие значения режимных и конструктивных параметров или пределы их изменения: $\{r_{ci} = 3{,}0\cdot10^{-2}$ м; $l_{bi} = 4{,}5\cdot10^{-2}$ м; $\varphi_i = (-0{,}3927)$ рад; $u_{ri} = 2$; $u_{si} = 8\} \in \{a_{1,\,k1}\}$; $\{\omega_i = (41 - 53)$ с$^{-1}$; $h_{0i} = 3{,}0\cdot10^{-2}$ м; $h_{Li} = 3{,}0\cdot10^{-2}$ м; $k_u = 5{,}4\cdot10^{-4}$ кг·м/рад$\} \in \{b_{i,\,li}\}$. Полученные зависимости для параметра $E_{0ij}(\delta_i, \omega_i)$, $i = 1, 2,$ представлены на рис. 3.

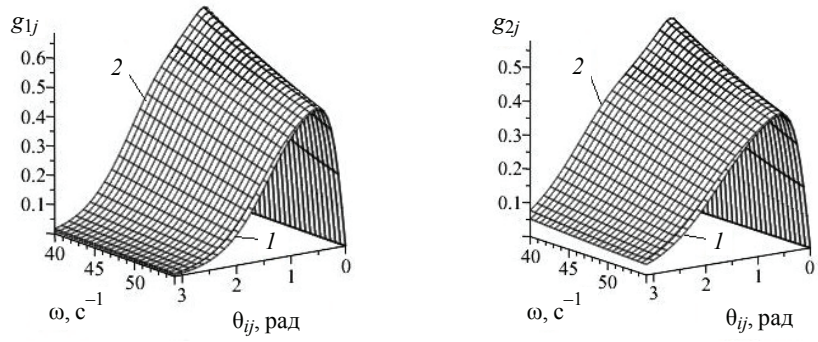
Результаты моделирования функций $g_{ij}(\theta_{ij})$ и $G_i(\theta_{ij})$ в зависимости от угловой скорости вращения барабанов ω_i, угла разбрасывания частиц макросистем полимерных дисперсных компонентов θ_{ij} и угла смещения при закреплении упругих лопаток φ_i согласно (16), (17) приведены на рис. 4, 5.

Таким образом, полученные зависимости (16), (17) для функций $g_{ij}(\theta_{ij})$ и $G_i(\theta_{ij})$ позволяют провести анализ наиболее значимых факторов повышения эффективности операции смешения полимерных компонентов (см. рис. 4, 5) при формировании их разреженных потоков двухрядными упругими лопастями (см. рис. 2). Заметим, что данный способ формирования потоков смешиваемых компонентов полипропиленов двух видов реализуется на первой стадии работы ротационного смесителя, используемого для предварительного смешения дисперсных полимерных материалов перед загрузкой в инжекционно-литьевую машину (см. рис. 1).



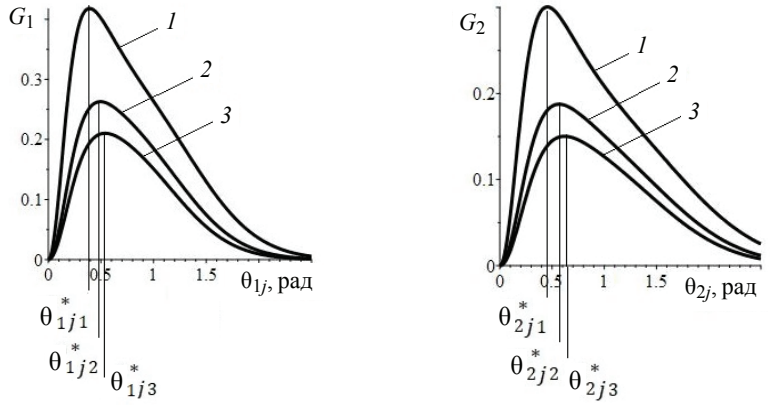
а) *б*)

Рис. 3. Зависимость $E_{0ij}(\delta_i, \omega_i)$:
а – полипропилен вторичный ГОСТ 29996-86 (i = 1); *б* – полипропилен первичный ГОСТ 29996-86 (i = 2); $u_{si} = 8$; $u_{ri} = 2$; *1* – j = 1, $\varphi_i = 0$; *2* – j = 2, $\varphi_i = 0{,}3927$ рад



а) *б*)

Рис. 4. Зависимость $g_{ij}(\theta_{ij}, \omega_i)$:
а – полипропилен вторичный ГОСТ 29996-86 (i = 1); *б* – полипропилен первичный ГОСТ 29996-86 (i = 2); u_{si} = 8; u_{ri} = 2; δ_i = 0,67; *1* – j = 1, φ_i = 0; *2* – j = 2, φ_i = 0,3927 рад



а) *б*)

Рис. 5. Зависимость $G_i(\theta_{ij}, \omega_i)$:
а – полипропилен вторичный ГОСТ 29996-86 (i = 1); *б* – полипропилен первичный ГОСТ 29996-86 (i = 2); u_{si} = 8; u_{ri} = 2; ω_i = 57,6 с$^{-1}$; *1* – δ_i = 0,60; *2* – δ_i = 0,67; *3* – δ_i = 0, 70

Теоретически установлено, что из наборов параметров (конструктивных $\{a_{1,\,k1}\}$ и режимных $\{b_{i,\,li}\}$) в выражениях (3), (4) особую значимость при оценке требуемого качества смеси имеют следующие характеристики смешения:

1) комбинированный параметр $\delta_i = r_{ci} / l_{bi}$ (степень деформации упругих прямоугольных лопаток при разбрасывании полимерных компонентов $i = \overline{1, 2}$) аналогично [15];

2) конструктивные параметры: u_{ri} – число рядов данных деформируемых лопаток ($j = \overline{1, u_{ri}}$; u_{ri} = 2) на цилиндрических поверхностях смесительных барабанов для образования разреженных потоков компонентов $i = \overline{1, 2}$; φ_i – углы смещения при закреплении упругих лопаток на поверхности барабанов указанных компонентов $i = \overline{1, 2}$ [16];

3) режимные параметры: ω_i – угловые скорости вращения барабанов при образовании разреженных потоков компонентов $i = \overline{1, 2}$.

Согласно рис. 4 поверхности для дифференциальных функций распределения $g_{ij}(\theta_{ij})$ числа частиц полипропилена вторичного (i = 1, см. рис. 3, *а*) и первичного (i = 2, см. рис. 4, *б*) по углу разбрасывания θ_{ij} из (6) при деформациях упругих лопаток ряда $j = \overline{1, u_{ri}}$; $u_{ri} = 2$ имеют один выраженный максимум. При этом в случае как вторичного (графики *1* и *2*, см. рис. 4, *а*), так и первичного (графики *1* и *2*, см. рис. 4, *б*) полипропилена наблюдаются близкие значения для указанных максимумов, относящихся к разным рядам упругих лопастей.

В частности, для отношений максимальных значений, соответствующих рядам упругих лопастей при $j = \overline{1, 2}$, выполняются условия: $g_{i1}^{\max} \big/ g_{i2}^{\max} \approx 0{,}99$; $\theta_{i2}^{*} - \theta_{i1}^{*} = 0{,}01$ рад. Возрастание значений угла разбрасывания θ_{ij} в 3 раза по сравнению с экстремальными значениями $\theta_{i1}^{*}, \theta_{i2}^{*}$ приводит к падению значений функции $g_{ij}(\theta_{ij})$ при $g_{11}/g_{12} \approx 0{,}88$; $g_{21}/g_{22} \approx 0{,}81$. Данный результат показывает, что наличие второго ряда упругих лопастей (j = 1), закрепленных на барабане с угловым смещением φ_i, отражается на повышении не только значений функций распределения $g_{ij}(\theta_{ij})$ (см. рис. 4), но и для полных функций распределения $G_i(\theta_{ij})$ (см. рис. 5).

Сравнение $G_1(\theta_{1j})$, $G_2(\theta_{2j})$ при значениях степени деформирования лопатки δ_i = 0,70 для смешиваемых полимерных компонентов i = 1 и i = 2 (графики *3*, см. рис. 5 соответственно *а* и *б*) дает картину сближения экстремальных значений углов разбрасывания $\theta_{1j}^{*}, \theta_{2j}^{*}$. Выполняются отношения: $\theta_{1j}^{*} \big/ \theta_{2j}^{*} \approx 1{,}23$; $G_1^{\max} \big/ G_2^{\max} \approx 1{,}28$. Аналогичная тенденция прослеживается для данных функций при значениях: δ_i = 0,60 (графики *1*, см. рис. 5, *а*, *б*), когда $\theta_{1j}^{*} \big/ \theta_{2j}^{*} \approx 1{,}22$; $G_1^{\max} \big/ G_2^{\max} \approx 1{,}40$ и δ_i = 0,67 (графики *2*, см. рис. 5, *а*, *б*), когда $\theta_{1j}^{*} \big/ \theta_{2j}^{*} \approx 1{,}25$; $G_1^{\max} \big/ G_2^{\max} \approx 1{,}40$.

Заключение

Указанные условия для дифференциальных функций распределения числа частиц полипропилена вторичного и первичного по углу разбрасывания после работы упругих лопастей каждого ряда в отдельности и работы двухрядных лопастей вместе характеризуют эффективность процесса получения дисперсной полимерной смеси на первой стадии работы ротационного аппарата по критерию сближения кривых для смешиваемых компонентов. Дополнительное применение второго ряда упругих лопаток позволяет сместить рассеянные потоки дисперсных полимерных компонентов в более узкий интервал изменения экстремальных значений для углов их разбрасывания. Таким образом, актуальная проблема рециклинга для совершенствования технической поддержки цифровых технологий, в том числе на различных этапах 3D-печати, может быть решена с помощью дополнительно процесса смешения полимерных компонентов вторичного и первичного типов в ротационном аппарате.

Список литературы

1. Development and Characterisation of 3D Printing Finishing Process Applying Recycled Plastic Waste / M. W. M. Cunico, D. A. Kai, P. M. Cavalheiro, J. de Carvalho // Virtual and Physical Prototyping. – 2019. – Vol. 14, No. 1. – P. 37 – 52. doi: 10.1080/17452759.2018.1521248

2. Моделирование процесса ротационного смешивания сыпучих компонентов на платформе кибер-физических систем / А. Б. Капранова, Д. Д. Бахаева, Д. В. Стенько, И. И. Верлока // Мат. методы в технике и технологиях. – 2020. – Т. 4. – С. 20 – 26.

3. Dong, Y. Additive Manufacturing of Mechanical Testing Samples Based on Virgin Poly (Lactic Acid) (PLA) and PLA/Wood Fibre Composites / Y. Dong, J. Milentis, A. Pramanik // Advances in Manufacturing.– 2018. – Vol. 6. – P. 71 – 82. doi: 10.1007/s40436-018-0211-3

4. Капранова, А. Б. Стохастическое описание процесса формирования потоков сыпучих компонентов в аппаратах со щеточными элементами / А. Б. Капранова, И. И. Верлока // Теоретические основы хим. технологии. – 2018. – Т. 52, № 6. – С. 707 – 721.

5. Капранова, А. Б. Моделирование критерия качества смеси в объеме барабанно-ленточного устройства / А. Б. Капранова, М. Н. Бакин, И. И. Верлока // Хим. и нефтегазовое машиностроение. – 2018. – № 5. – С. 3 – 9.

6. Исследование качества смеси на первой стадии работы аппарата гравитационного типа / А. Б. Капранова, И. И. Верлока, П. А. Яковлев, Д. Д. Бахаева // Российский хим. журнал. – 2018. – Т. 62, № 4. – С. 48 – 50.

7. Исследование энергетических характеристик процесса смешивания сыпучих компонентов в ротационном аппарате / А. Б. Капранова, Д. Д. Бахаева, Д. В. Стенько, И. И. Верлока // Вестн. Ивановского гос. энергетического ун-та. – 2020. – № 3. – С. 70 – 78. doi: 10.17588/2072-2672.2020.3.070-078

8. Пат. 2749510 Российская Федерация, МПК B01F 3/18, B01F 5/04, B01F 7/00, B01F 9/10. Смеситель сыпучих материалов / А. Е. Лебедев, А. Б. Капранова, Д. В. Стенько ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет». – № 2020123334 ; заявл. 07.07.2020 ; опубл. 11.06.2021, Бюл. № 17. – 8 с.

9. Макаров, Ю. И. Аппараты для смешения сыпучих материалов / Ю. И. Макаров. – М. : Машиностроение, 1973. – 216 с.

10. Кафаров, В. В. Системный анализ процессов химической технологии. Процессы измельчения и смешения сыпучих материалов / В. В. Кафаров, И. Н. Дорохов, С. Ю. Арутюнов ; отв. ред. Н. М. Жаворонков. – М. : Наука, 1985. – 440 с.

11. Першин, В. Ф. Использование численных экспериментов для оптимизации процесса смешения сыпучих материалов / В. Ф. Першин, Ю. Т. Селиванов, А. В. Орлов // Теоретические основы хим. технологии. – 2004. – Т. 38, № 2. – С. 209 – 214.

12. Климонтович, Ю. Л. Турбулентное движение и структура хаоса. Новый подход к статистической теории открытых систем / Ю. Л. Климонтович. – М. : ЛЕНАНД, 2014. – 328 с.

13. Stochastic Analysis of Impact Mixing of Bulk Materials in a Rotary Apparatus / A. Kapranova, D. Bahaeva, D. Stenko [et al.] // E3S Web of Conference. – 2021. – Vol. 247. – P. 01048. doi: 10.1051/e3sconf/202124701048

14. Стохастический анализ ротационного смешения полимерных компонентов в рамках рециклинга и развития технологий 3D-печати / Д. В. Стенько, А. Б. Капранова, Д. Д. Бахаева [и др.] // Хим. и нефтегазовое машиностроение. – 2021. – Т. 57, № 11. – С. 16 – 21.

15. Влияние влажности сыпучих сред на их распределение в рабочем объеме смесителя с подвижной лентой / А. Б. Капранова, М. Н. Бакин, И. И. Верлока, А. И. Зайцев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 1. – С. 97 – 104. doi: 10.17277/vestnik.2015.01.pp.097-104

16. Анализ получения дисперсной смеси с вторичным сырьем для кибер-физической поддержки рециклинга / Д. В. Стенько, А. Б. Капранова, Д. Д. Бахаева [и др.] // Мат. методы в технологиях и технике. – 2021. – № 12. – С. 26 – 32. doi: 10.52348/2712-8873_MMTT_2021_12_26

Analysis of Mixing the Solid Dispersed Polymer Raw Materials for Cyber-Physical Support of Recycling

D. V. Stenko[1], A. B. Kapranova[1], D. D. Bakhaeva[2], D. V. Fedorova[1], A. E. Lebedev[3]

Departments of Theoretical and Applied Mechanics (1), kapranova_anna@mail.ru; Information Systems and Technologies (2), Technological Machines and Equipment (3), Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia

Keywords: secondary raw materials; model; options; process; recycling; mixing; solid dispersion mixture; elastic blades.

Abstract: In the framework of the stochastic approach to modeling the process of preparing a dispersed mixture with secondary raw materials in the working volume of a rotary device, an analysis was made of the most significant factors for increasing the efficiency of the operation of mixing polymer components. In this case, the energy method of modeling the mechanism of behavior of mixed non-spherical particles in rarefied flows formed by double-row elastic blades tangential to the mixing drum was used. An analysis has been carried out that takes into account the corresponding sets of design and operating parameters of a rotary mixer designed for preliminary preparation of the operation of an injection molding machine.

References

1. Cunico M.W.M., Kai D.A., Cavalheiro P.M., de Carvalho J. Development and Characterisation of 3D Printing Finishing Process Applying Recycled Plastic Waste, *Virtual and Physical Prototyping*, 2019, vol. 14, no. 1, pp. 37-52, doi: 10.1080/17452759.2018.1521248

2. Kapranova A.B., Bakhayeva D.D., Sten'ko D.V., Verloka I.I. [Modeling the process of rotary mixing of bulk components on the platform of cyber-physical systems], *Matematicheskiye metody v tekhnike i tekhnologiyakh* [Mathematical methods in engineering and technologies], 2020, vol. 4, pp. 20-26. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Dong Y., Milentis J., Pramanik A. Additive Manufacturing of Mechanical Testing Samples Based on Virgin Poly (Lactic Acid) (PLA) and PLA/Wood Fibre Composites, *Advances in Manufacturing*, 2018, vol. 6, pp. 71-82, doi: 10.1007/s40436-018-0211-3

4. Kapranova A.B., Verloka I.I. [Stochastic description of the process of formation of flows of bulk components in apparatuses with brush elements], *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical foundations of chemical technology], 2018, vol. 52, no. 6, pp. 707-721. (In Russ., abstract in Eng.)

5. Kapranova A.B., Bakin M.N., Verloka I.I. [Modeling of the mixture quality criterion in the volume of a drum-tape device], *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye* [Chemical and oil and gas engineering], 2018, no. 5, pp. 3-9. (In Russ., abstract in Eng.)

6. Kapranova A.B., Verloka I.I., Yakovlev P.A., Bakhayeva D.D. [Study of mixture quality at the first stage of operation of a gravity-type apparatus], *Rossiyskiy*

khimicheskiy zhurnal [Russian Chemical Journal], 2018, vol. 62, no. 4, pp. 48-50. (In Russ., abstract in Eng.)

7. Kapranova A.B., Bakhayeva D.D., Sten'ko D.V., Verloka I.I. [Study of the energy characteristics of the process of mixing loose components in a rotary apparatus], *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University], 2020, no. 3, pp. 70-78, doi: 10.17588/2072-2672.2020.3.070-078 (In Russ., abstract in Eng.)

8. Lebedev A.Ye., Kapranova A.B., Sten'ko D.V. *Smesitel' sypuchikh materialov* [Mixer of bulk materials], Russian Federation, 2021, Pat. 2749510. (In Russ.)

9. Makarov Yu.I. *Apparaty dlya smesheniya sypuchikh materialov* [Apparatus for mixing bulk materials], Moscow: Mashinostroyeniye, 1973, 216 p. (In Russ.)

10. Kafarov V.V., Dorokhov I.N., Arutyunov S.Yu. *Sistemnyy analiz protsessov khimicheskoy tekhnologii. Protsessy izmel'cheniya i smesheniya sypuchikh materialov* [System analysis of chemical technology processes. Processes of grinding and mixing of bulk materials], Moscow: Nauka, 1985, 440 p. (In Russ.)

11. Pershin V.F., Selivanov Yu.T., Orlov A.V. [The use of numerical experiments to optimize the process of mixing bulk materials], *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical foundations of chemical technology], 2004, vol. 38, no. 2, pp. 209-214. (In Russ.)

12. Klimontovich Yu.L. *Turbulentnoye dvizheniye i struktura khaosa. Novyy podkhod k statisticheskoy teorii otkrytykh sistem* [Turbulent motion and the structure of chaos. A new approach to the statistical theory of open systems], Moscow: LENAND, 2014, 328 p. (In Russ.)

13. Kapranova A., Bahaeva D., Stenko D., Fedorova D., Vatagin A., Lebedev A. Stochastic Analysis of Impact Mixing of Bulk Materials in a Rotary Apparatus, *E3S Web of Conference*, 2021, vol. 247, p. 01048, doi: 10.1051/e3sconf/202124701048

14. Sten'ko D.V., Kapranova A.B., Bakhayeva D.D., Fedorova D. V., Lebedev A. Ye. [Stochastic analysis of rotational mixing of polymer components in the framework of recycling and development of 3D printing technologies], *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye* [Chemical and oil and gas engineering], 2021, vol. 57, no. 11, pp. 16-21. (In Russ.)

15. Kapranova A.B., Bakin M.N., Verloka I.I., Zaytsev A.I. [Influence of humidity of loose media on their distribution in the working volume of a mixer with a movable belt], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 1, pp. 97-104, doi: 10.17277/vestnik.2015.01.pp.097-104 (In Russ., abstract in Eng.)

16. Sten'ko D.V., Kapranova A.B., Bakhayeva D.D., Fedorova D.V., Lebedev A.Ye. [Analysis of obtaining a dispersed mixture with secondary raw materials for cyber-physical support of recycling], *Matematicheskiye metody v tekhnologiyakh i tekhnike* [Mathematical methods in technologies and engineering], 2021, no. 12, pp. 26-32, doi: 10.52348/2712-8873_MMTT_2021_12_26 (In Russ., abstract in Eng.)

Analyse des Mischens von festen dispergierten Polymerrohstoffen für cyber-physische Recycling-Unterstützung

Zusammenfassung: Im Rahmen des stochastischen Ansatzes zur Modellierung des Prozesses der Gewinnung der dispergierten Mischung mit Sekundärrohstoffen im Arbeitsvolumen einer Rotationsvorrichtung ist die Analyse der wichtigsten Faktoren zur Steigerung der Effizienz des Mischvorgangs der Polymerkomponente durchgeführt worden. Dabei ist die energetische Methode zur Modellierung des Verhaltensmechanismus gemischter nicht kugelförmiger Partikel in verdünnten Strömungen verwendet worden, die durch doppelreihige elastische Schaufeln tangential

zur Mischtrommel gebildet werden. Es ist eine Analyse durchgeführt, die die entsprechenden Sätze von Konstruktions- und Betriebsparametern eines Rotationsmischers berücksichtigt, der für die Vorbereitung des Betriebs der Injektions- und Spritzgießmaschine vorgesehen ist.

Analyse de mélange des polymères solides dispersées pour le support cyber-physique du recyclage

Résumé: Dans le cadre de l'approche stochastique envers la modélisation du processus d'obtention d'un mélange dispersé avec des matières premières secondaires dans le volume de travail du dispositif de rotation, sont analysés les facteurs les plus importants d'augmentation de l'efficacité de l'opération de mélange des composants polymers. Est utilisée une méthode d'énergie pour modéliser le mécanisme du comportement des particules non sphériques mélangées dans des flux clairsemés formés par des lames élastiques à deux rangées tangentes au tambour de mélange. Esr réalisée une analyse en tenant compte des ensembles appropriés de paramètres de la conception et du fonctionnement du mélangeur rotatif destiné à la préparation préalable du fonctionnement de la machine d'injection et de moulage par injection.

Авторы: ***Стенько Дмитрий Владимирович*** – аспирант кафедры «Теоретическая и прикладная механика»; ***Капранова Анна Борисовна*** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная механика»; ***Бахаева Дарья Дмитриевна*** – старший преподаватель кафедры «Информационные системы и технологии»; ***Федорова Дарья Владимировна*** – аспирант кафедры «Теоретическая и прикладная механика»; ***Лебедев Антон Евгеньевич*** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технологические машины и оборудование», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Ярославль, Россия.

УДК 66.087.97; 51-7
DOI: 10.17277/vestnik.2022.04.pp.628-636

РАСЧЕТ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАССОПЕРЕНОСА ЧЕРЕЗ ИОНООБМЕННЫЕ МЕМБРАНЫ НА ОСНОВЕ ФРИКЦИОННОЙ ТЕОРИИ

К. В. Шестаков

Кафедра «Механика и инженерная графика», kostyanshestakov@mail.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия

Ключевые слова: коэффициенты трения; массоперенос; математическая модель; программный комплекс; промышленные растворы; электродиализ.

Аннотация: Проведены расчет и прогнозирование кинетических параметров процесса разделения растворов с помощью усовершенствованной математической модели, описывающей массоперенос через ионообменную мембрану при применении электродиализа. Установлено, что с увеличением электрического потенциала происходит увеличение значений фрикционного коэффициента f_{+m} для всех исследуемых растворов, которое варьируется в пределах 5 – 20 % на всем интервале прикладываемого к мембранной системе напряжения; по полученным аппроксимационным зависимостям фрикционных коэффициентов от приложенного напряжения можно найти значения потока вещества через ионообменную мембрану, используемые для прогнозирования кинетических характеристик и расчета электромембранных установок.

Обозначения

F_i – движущая сила (электрохимический потенциал) к 1 молю частиц i, Н/моль;

F_{ij} – сила внутреннего фрикционного взаимодействия между частицами i и j в единице объема, Н/м^3;

J_i – плотность потока частиц i, моль/(м^2·с).

$\bar{c}_i$ – концентрация частиц i в 1 единице объема системы, моль/м^3;

f_{ij} – коэффициент трения, Н·с/(моль·м);

m – мембрана;

n_{ij} – нормированный фрикционный коэффициент, Н·с·м^2/моль^2;

υ_i – абсолютная скорость движения частиц i, м/с;

υ_j – абсолютная скорость движения частиц j, м/с;

ω – частицы растворителя;

$+$ – катионы;

$-$ – анионы

Последние десятилетия остро стоит проблема очистки промышленных растворов на предприятиях химических и гальванических производств [1 – 3]. В первую очередь это связано с тем, что производство таких предприятий включает множество химико-технологических операций с образованием после них стоков, содержащих опасные для природы загрязнители. Кроме того, в настоящее время извлекается лишь 15 – 20 % от общего количества ценных металлов в стоках, которые можно было бы использовать повторно. Отсюда вытекает необходимость разработки технологического оформления электромембранного оборудования для промышленных предприятий [1, 2]. В данный момент разрабатывается гибкий аппаратно-программный комплекс, обеспечивающий получение и анализ

исходных данных для проектирования, который позволит значительно облегчить и автоматизировать процесс прогнозирования технологических параметров процесса электрохимического разделения, а вследствие этого облегчить и разработку очистных систем требуемой мощности. Общая схема функционирования программного комплекса представлена на рис. 1. Разработка программного комплекса осуществляется на основе фрикционной теории переноса веществ через мембрану.

Цель работы – расчет и прогнозирование кинетических параметров процесса разделения растворов с помощью усовершенствованной математической модели, которая описывает массоперенос через ионообменную мембрану при применении электродиализа.

Математическая модель электродиализного разделения промышленных растворов на основе фрикционной теории заключается том, что в рассматриваемой системе все компоненты перемещаются относительно друг друга под действием некоторых внешних сил, осуществляя взаимное трение, в результате чего образуются фрикционные силы F_{ij}. При этом все частицы движутся с постоянной скоростью, а в системе наблюдается баланс внешних сил и сил трения:

$$F_{ij} = -\bar{c}_i f_{ij}\left(\upsilon_i - \upsilon_j\right); \tag{1}$$

$$\bar{c}_i F_i + \sum F_{ij} = 0, \tag{2}$$

где F_{ij} – сила внутреннего фрикционного взаимодействия между частицами i и j в единице объема, Н/м^3; $\bar{c}_i$ – концентрация частиц i в 1 единице объема системы, моль/м^3; f_{ij} – коэффициент трения, Н·с·моль$^{-1}$·м$^{-1}$; υ_i и υ_j – абсолютные скорости движения частиц соответственно i и j, м/с; F_i – движущая сила (электрохимический потенциал) к 1 молю частиц i, Н/моль.

На рисунке 2 представлена схема массопереноса через катионообменную мембрану в процессе электродиализного разделения.

Согласно предлагаемой модели взаимодействие всех приложенных к частицам сил в рассматриваемом объеме можно описать системой уравнений:

$$\begin{cases} \bar{c}_+ F_+ - \bar{c}_+ f_{+-}\left(\upsilon_+ - \upsilon_-\right) - \bar{c}_+ f_{+\omega}\left(\upsilon_+ - \upsilon_\omega\right) - f_{+m} J_+ = 0\,; \\ \bar{c}_- F_- - \bar{c}_- f_{-+}\left(\upsilon_- - \upsilon_=\right) - \bar{c}_- f_{-\omega}\left(\upsilon_- - \upsilon_\omega\right) - f_{-m} J_- = 0\,; \\ \bar{c}_\omega F_\omega - \bar{c}_\omega f_{\omega+}\left(\upsilon_\omega - \upsilon_+\right) - \bar{c}_\omega f_{\omega-}\left(\upsilon_\omega - \upsilon_-\right) - f_{\omega m} J_\omega = 0\,; \\ \bar{c}_m F_m - \bar{c}_m f_{m+}\upsilon_+ - \bar{c}_m f_{m-}\upsilon_- - \bar{c}_m f_{m\omega}\upsilon_\omega = 0. \end{cases} \tag{3}$$

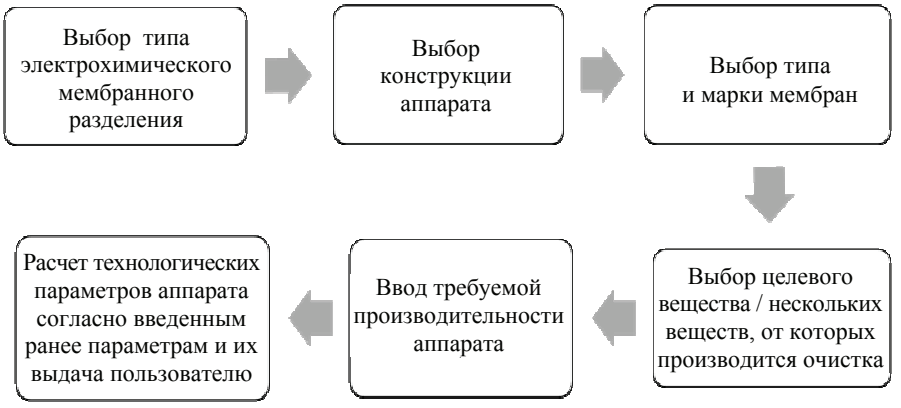


Рис. 1. Общая схема функционирования программного комплекса

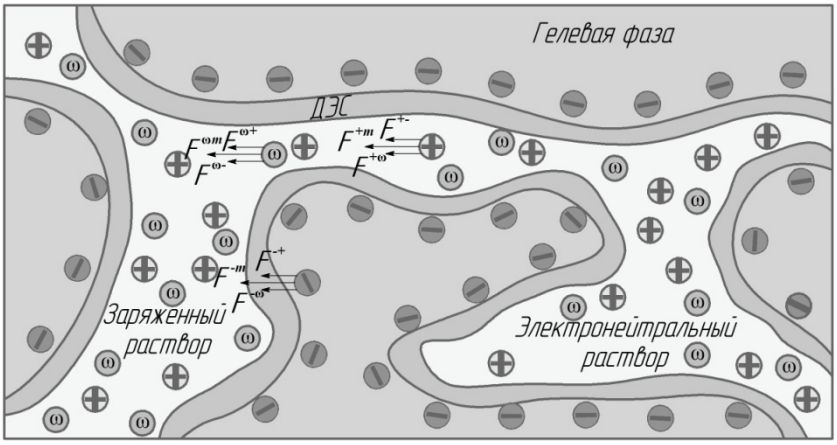


Рис. 2. Структурная схема массопереноса через катионообменную мембрану в процессе электродиализного разделения

В данной системе неизвестны 12 коэффициентов трения между составляющими компонентами (катионами, анионами, растворителем и мембраной): f_{+-}, f_{-+}, $f_{+\omega}$, $f_{\omega+}$, f_{+m}, f_{m+}, $f_{-\omega}$, $f_{\omega-}$, f_{m-}, f_{-m}, $f_{\omega m}$, $f_{m\omega}$. Однако перекрестные коэффициенты трения могут быть выражены друг через друга за счет равенства перекрестных нормированных коэффициентов n_{ij} и n_{ji}, входящих в их состав ($f_{ij} = c_j n_{ij}$). При этом следует отметить, что изначальное число неизвестных коэффициентов больше числа независимых уравнений, что требует некоторых допущений, к которым можно отнести следующие [3]:

– в рассматриваемой системе силы трения между катионами и анионами ничтожно малы, что ими можно пренебречь;

– между коэффициентами трения $f_{+\omega}$ и $f_{-\omega}$ есть некоторая взаимосвязь, заключающаяся в том, что ионы растворенных веществ с различной молярной массой при прочих равных условиях будут по-разному скользить относительно ионов и молекул растворителя, так как сила трения скольжения прямо пропорциональна прижимающей силе (силе реакции опоры). Следовательно, через соотношение молярных масс катионов и анионов можно выразить соотношение и коэффициентов $f_{-\omega} = f_{+\omega}(M_-/M_+)$.

Для того чтобы окончательно решить систему уравнений (3) и рассчитать коэффициенты трения, необходимо также определить те внешние силы, которые входят в электрохимический потенциал и обуславливают движение частиц.

При электродиализном процессе растворенные частицы движутся через мембрану вследствие диффузионного и электродиффузионного потоков, а перенос растворителя обеспечивается электроосмотическим и осмотическим потоками [4]. Поэтому в случае электродиализа движущие силы для растворенных веществ и растворителя можно определить следующим образом:

$$F_+ = -\frac{d\mu_+}{dx} = -RT - \frac{d(\ln a_+)}{dx} - z_+ F \frac{d\varphi}{dx}; \quad (4)$$

$$F_- = -\frac{d\mu_-}{dx} = -RT - \frac{d(\ln a_-)}{dx} - z_- F \frac{d\varphi}{dx}; \quad (5)$$

$$F_\omega = -\frac{d\mu_\omega}{dx} = -RT - \frac{d(\ln a_\omega)}{dx} - \frac{\bar{c}_\omega \varepsilon\varepsilon_0 \xi_0 d\varphi}{L_\omega \eta dx} z_+ F \frac{d\varphi}{dx}, \quad (6)$$

где μ_+, μ_- и μ_ω – электрохимический потенциал относительно растворенного вещества и растворителя соответственно, Н·м·моль$^{-1}$; R – универсальная газовая постоянная, м^2·кг·с$^{-2}$·К$^{-1}$·моль$^{-1}$; T – температура, К; a_+, a_- и a_ω – активности катионов, анионов и частиц растворителя соответственно; z_+, z_- – заряды катионов и анионов; F – постоянная Фарадея, Кл·моль$^{-1}$; φ – электрический потенциал, В; ε – относительная диэлектрическая проницаемость растворителя; ε_0 – электрическая постоянная, Ф·м$^{-1}$; ξ_0 – потенциал у стенок мембраны, В; η – динамическая вязкость растворителя, Н·с·м$^{-2}$; L_ω – диагональный коэффициент проводимости растворителя, моль^2·с$^{-1}$·Дж$^{-1}$·м$^{-1}$.

Граничные условия для электродиализного процесса разделения:

$$\begin{cases} c(0) = c_н, c(x) = c_к \ ; \\ \varphi(0) = \varphi_н, \varphi(x) = \varphi_к . \end{cases} \quad (7)$$

Интерес в ходе выполнения данной работы представляет коэффициент f_{+m}, характеризующий трение катионов металлов о поверхность (гелевую фазу) ионообменной мембраны при их движении. Расчетное уравнение для него не зависит от других коэффициентов трения

$$f_{+m} = \frac{2\bar{c}_+ F_+ + 3\bar{c}_- F_- + \bar{c}_\omega F_\omega}{2J_+} . \quad (8)$$

Также исследован коэффициент трения между катионами и растворителем $f_{+\omega}$

$$f_{+\omega} = \frac{\bar{c}_+ F_+ + \bar{c}_+ \upsilon_+ \left[\left(2\bar{c}_+ F_+ + 3\bar{c}_- F_- + \bar{c}_\omega F_\omega \right) / 2J_+ \right]}{\bar{c}_+ (\upsilon_+ - \upsilon_\omega)} . \quad (9)$$

Для расчета коэффициентов трения необходимо провести ряд экспериментальных исследований. С этой целью использованы три однокомпонентных водных раствора, содержащих растворенные вещества $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ (ч.), $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ (ч.) и $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ (ч.) с концентрацией, аналогичной реальным промышленным растворам (160 мг/л для каждого металла).

Процесс разделения проводили на лабораторной электродиализной установке (рис. 3) с применением пакета чередующихся ионообменных мембран МК-40Л и МА-41П производства АО «Щекиноазот» (Россия). Установка включала в себя электродиализную ячейку и три подключенных к ней независимых линий циркуляции растворов (по одной линии для дилюата, концентрата и приэлектродного раствора). Ячейку собирали из уложенных в определенном порядке анионо- и катионообменных мембран с активной площадью 306,25 см^2 каждая, полимерных прокладок, двух плит корпуса с каналами ввода и вывода растворов, двух электродов, входных и выходных штуцеров.

Исходные растворы заливали в емкость дилюата *1*. В аналогичные емкости в линиях концентрата и приэлектродного раствора заливали дистиллированную воду. Начальный объем растворов в каждой из трех емкостей составлял 5 л. Из исходных емкостей с помощью мембранных пневматических насосов *2* марки Fluimac по соответствующим линиям подавались растворы к электродиализной

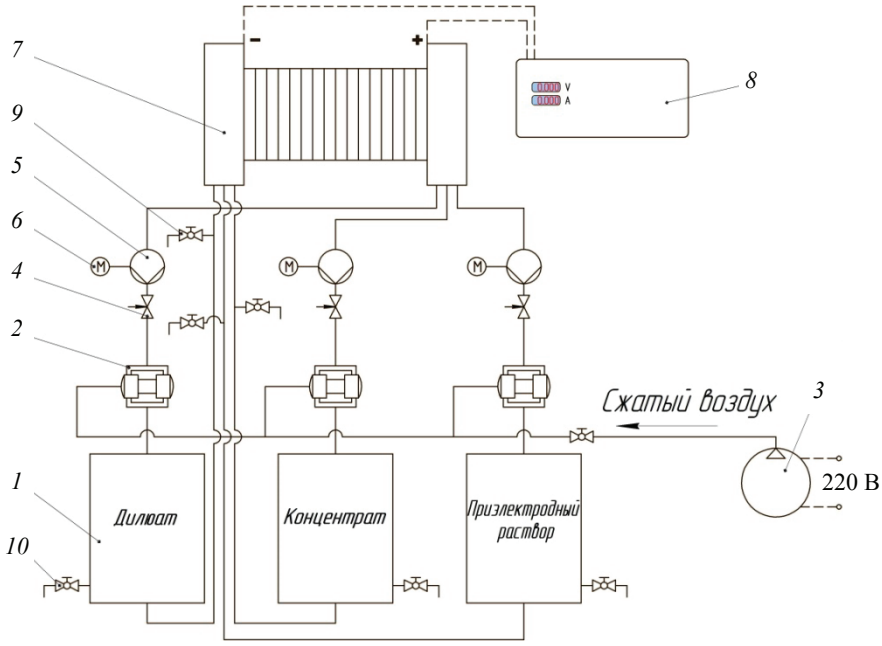


Рис. 3. Электродиализная установка

ячейке *7*. Работа насосов обеспечивалась подачей сжатого воздуха масляным компрессором *3*. Циркуляцию растворов в каждой линии регулировали контрольными клапанами *4*, расходомерами *5* и манометрами *6*. Подачу напряжения к электродиализной ячейке осуществляли с помощью лабораторного источника питания *8*. Сбор образцов для анализа проводили с помощью выпускных кранов *9*, а слив отработанных растворов – с помощью выпускных кранов *10*.

Разделение каждого раствора проводилось при напряжениях 19, 22, 25, 28 В. Данные величины напряжения предварительно определены в процессе исследования вольтамперных характеристик мембранной системы МК-40Л/МА-41П. Исходные растворы заливались в камеру для дилюата. Во время эксперимента замерялась концентрация растворенных веществ в камерах для концентрата и дилюата в целях дальнейшего определения значений плотности потока ионов через мембрану.

В результате проведенных экспериментов по электродиализному разделению для всех растворов рассчитаны дискретные значения коэффициентов трения f_{+m}, $f_{+\omega}$ и проведена их аппроксимация экспоненциальной функцией вида $y(x) = b + c{\cdot}e^{dx}$ с коэффициентом детерминации более 0,99 (рис. 4).

Очевидно, что с увеличением электрического потенциала происходило увеличение значений фрикционного коэффициента f_{+m} для всех исследуемых растворов. Увеличение значений фрикционных коэффициентов варьировались в пределах 5 – 20 % на всем интервале прикладываемого к мембранной системе напряжения. Наибольшие значения f_{+m} характерны для разделения раствора $CuSO_4{\cdot}5H_2O$ – от $4{,}81{\cdot}10^{17}$ до $7{,}06{\cdot}10^{17}$ Н·с/(моль·м). Наименьшие значения выявлены при разделении раствора $Ni(NO_3)_2{\cdot}6H_2O$ – от $1{,}22{\cdot}10^{17}$ до $1{,}78{\cdot}10^{17}$ Н·с/(моль·м).

В отличие от f_{+m} максимальные значения фрикционного коэффициента $f_{+\omega}$ свойственны для разделения водного раствора $Fe(NO_3)_3{\cdot}9H_2O$. В данном случае также при увеличении прикладываемого к мембранной системе напряжения с 19 до 28 В наблюдался наиболее резкий рост значений $f_{+\omega}$ с $5{,}46{\cdot}10^{18}$

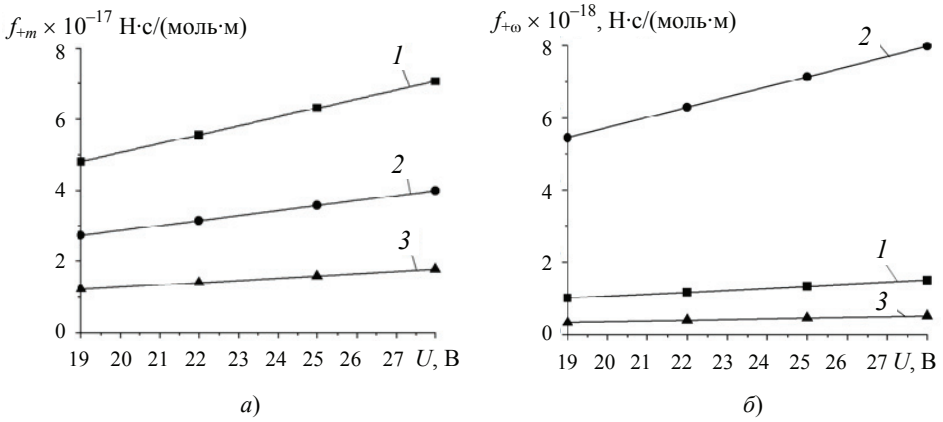


Рис. 4. Зависимость фрикционных коэффициентов f_{+m} (*а*) и $f_{+\omega}$ (*б*) от наложенного напряжения при разделении растворов $CuSO_4$ (*1*), $Fe(NO_3)_3$ (*2*) и $Ni(NO_3)_2$ (*3*) мембраной МК-40Л

до $7{,}98 \cdot 10^{18}$ Н·с/(моль·м). Для растворов $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ и $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ такой рост оказался менее значительным – с $1{,}03 \cdot 10^{18}$ до $1{,}51 \cdot 10^{18}$ Н·с/(моль·м) и с $3{,}64 \cdot 10^{18}$ до $5{,}32 \cdot 10^{18}$ Н·с/(моль·м) соответственно.

Для проверки адекватности полученных фрикционных коэффициентов проведен еще один эксперимент на представленной ранее электродиализной установке в целях получения данных по изменению концентрации растворенных веществ в камере для дилюата в течение 3600 с (рис. 5).

Учитывая наименьшие значения фрикционных коэффициентов f_{+m} и $f_{+\omega}$ для катионов Ni^{2+} в процессе электродиализного разделения, очистка от данного типа катионов должна была быть выше по сравнению с катионами Cu^{2+} и Fe^{3+}.

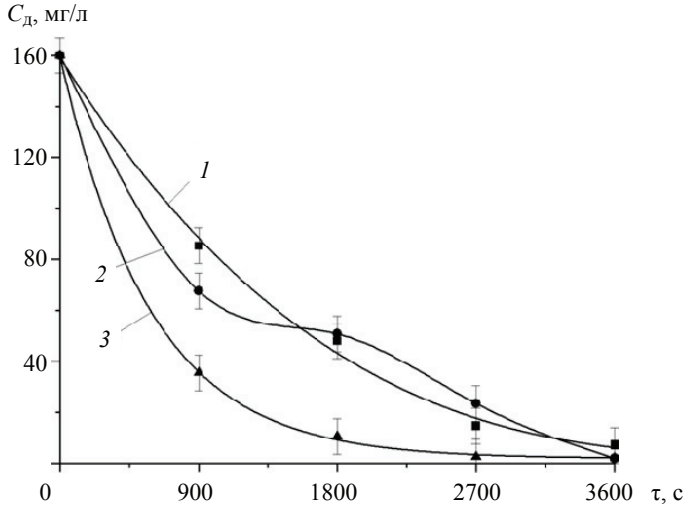


Рис. 5 Экспериментальные данные по изменению концентрации катионов металлов в камере дилюата $C_д$ от времени проведения эксперимента при разделении растворов: *1* – $CuSO_4$; *2* – $Fe(NO_3)_3$; *3* – $Ni(NO_3)_2$

Это подтвердилось полученными экспериментальными данными (см. рис. 5). От катионов Ni^{2+} раствор очищается значительно быстрее, причем степень очистки либо выше, либо на таком же уровне при сравнении с очисткой от других катионов.

Из-за предельно малой водопроницаемости ионообменных мембран большее значение имеет взаимодействие катионов с мембраной, а не с растворителем, что объяснило взаимосвязь между фрикционными коэффициентами и полученными данными по очистке растворов от катионов Cu^{2+} и Fe^{3+}. Большие значения коэффициента f_{+m} для катионов Cu^{2+} выразились в меньшей степени очистки раствора от данного типа катионов по сравнению с Fe^{3+}. При этом важно отметить замедление очистки от катионов Fe^{3+} во временно́м интервале 900…1800 с при разделении раствора $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$. Вероятно, это связано с влиянием коэффициента $f_{+\omega}$.

В заключение отметим, что рассчитанные значения фрикционных коэффициентов f_{+m} и $f_{+\omega}$ хорошо соотносятся с экспериментальными данными по изменению концентрации растворенных веществ в камере для дилюата, что подтверждает адекватность представленной математической модели. По полученным аппроксимационным зависимостям фрикционных коэффициентов от приложенного напряжения можно найти значения потока вещества через ионообменную мембрану, которые возможно эффективно использовать для прогнозирования механизма массопереноса и расчета электромембранных установок.

Работа выполнена при финансировании гранта Президента РФ для поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук № МК-4774.2022.4.

Список литературы

1. Лепеш, Г. В. Современные методы очистки сточных вод промышленных предприятий / Г. В. Лепеш, А. С. Панасюк, А. С. Чурилин // Технико-технологические проблемы сервиса. – 2016. – № 3 (37). – С. 14 – 23.

2. Козлова, Е. Б. Анализ проблемы очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов / Е. Б. Козлова, Э. С. Аминева, Э. В. Нафикова // Науч. электрон. журнал Меридиан. – 2020. – № 8 (42). – С. 369 – 371.

3. Мелехин, А. А. Проблема очистки сточных вод промышленных предприятий и способ решения / А. А. Мелехин // Естественные и техн. науки. – 2021. – № 1 (152). – С. 164 – 166.

4. Some Kinetic Dependence of Electrohyperfiltration Method of Purification of Wastewater from Iron Ions / A. A. Levin, O. A. Abonosimov, S. I. Lazarev [et al.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2018. – Т. 24, № 2. – С. 295 – 306. doi: 10.17277/vestnik.2018.02.pp.295-306

5. Критериальные зависимости процесса массопереноса электробаромембранного разделения технологических растворов от тяжелых металлов / О. А. Абоносимов, С. И. Лазарев, И. В. Зарапина [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2019. – Т. 25, № 3. – С. 442 – 452. doi: 10.17277/vestnik.2019.03.pp.442-452

6. Прогнозирование процесса электрохимического баромембранного разделения промышленных растворов на основе фрикционной теории / К. В. Шестаков, С. И. Лазарев, П. А. Хохлов, К. К. Полянский // Теоретические основы хим. технологии. – 2021. – Т. 55, № 6. – С. 754 – 763. doi: 10.31857/S0040357121050110

7. Заболоцкий, В. И. Перенос ионов в мембранах / В. И. Заболоцкий, В. В. Никоненко. – М. : Наука, 1996. – 392 с.

Calculation and Prediction of Kinetic Parameters of Mass Transfer through Ion-Exchange Membranes on the Basis of Friction Theory

K. V. Shestakov

Department of Mechanics and Engineering Graphics, kostyanshestakov@mail.ru; TSTU, Tambov, Russia

Keywords: coefficients of friction; mass transfer; mathematical model; software package; industrial solutions; electrodialysis.

Abstract: Calculation and prediction of the kinetic parameters of the process of separation of solutions using an improved mathematical model describing mass transfer through the ion-exchange membrane using electrodialysis have been carried out. It has been found that with an increase in the electric potential, there is an increase in the values of the friction coefficient f_{+m} for all the studied solutions, which varies within 5–20 % over the entire range of voltage applied to the membrane system. The ratio of the calculated values of the friction coefficients with the experimental data on the change in the concentration of dissolved substances in the diluate chamber showed the adequacy of the presented mathematical model. It has been established that, based on the obtained approximation dependences of the friction coefficients on the applied voltage, it is possible to find the values of the substance flux through the ion-exchange membrane, which are used to predict the kinetic characteristics and calculate electromembrane installations.

References

1. Lepesh G.V., Panasyuk A.S., Churilin A.S. [Modern methods of wastewater treatment of industrial enterprises], *Tekhniko-tekhnologicheskiye problemy servisa* [Technical and technological problems of service], 2016, no. 3 (37), pp. 14-23. (In Russ., abstract in Eng.)

2. Kozlova Ye.B., Amineva E.S., Nafikova E.V. [Analysis of the problem of wastewater treatment from heavy metal ions], *Nauchnyy elektronnyy zhurnal Meridian* [Scientific electronic journal Meridian], 2020, no. 8 (42), pp. 369-371. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Melekhin A.A. [The problem of wastewater treatment of industrial enterprises and the way to solve], *Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki* [Natural and technical sciences], 2021, no. 1 (152), pp. 164-166. (In Russ., abstract in Eng.)

4. Levin A.A., Abonosimov O.A., Lazarev S.I., Kovaleva O.A., Khorokhorina I.V., Kuznetsov M.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 (In Eng., abstract in Russ.)

5. Abonosimov O.A., Lazarev S.I., Zarapina I.V., Kotenev S.I., Ignatov N.N. [Criteria dependences of the process of mass transfer of electrobaromembrane separation of process solutions from heavy metals], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2019, vol. 25, no. 3, pp. 442-452, doi: 10.17277/vestnik.2019.03.pp.442-452 (In Russ., abstract in Eng.)

6. Shestakov K.V., Lazarev S.I., Khokhlov P.A., Polyanskiy K.K. [Forecasting the process of electrochemical baromembrane separation of industrial solutions based on frictional theory], *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical foundations of chemical technology], 2021, vol. 55, no. 6, pp. 754-763, doi: 10.31857/S0040357121050110 (In Russ., abstract in Eng.)

7. Zabolotskiy V.I., Nikonenko V.V. *Perenos ionov v membranakh* [Ion transfer in membranes], Moscow: Nauka, 1996, 392 p. (In Russ.)

Berechnung und Vorhersage der kinetischen Parameter des Massentransfers durch Ionenaustauschmembranen auf der Grundlage der Reibungstheorie

Zusammenfassung: Es sind Berechnung und Vorhersage der kinetischen Parameter des Prozesses der Trennung von Lösungen unter Verwendung des verbesserten mathematischen Modells durchgeführt, das den Stofftransport durch die Ionenaustauschmembran unter Verwendung von Elektrodialyse beschreibt. Es ist festgestellt, dass mit zunehmendem elektrischen Potential der Reibungskoeffizient f_{+m} für alle untersuchten Lösungen erhöht wird, der im gesamten Intervall der auf das Membransystem angewendeten Spannung zwischen 5 und 20 % variiert. Das Verhältnis der berechneten Werte der Reibungskoeffizienten zu den experimentellen Daten der Änderung der Konzentration gelöster Substanzen in der Diluatkammer zeigte die Angemessenheit des vorgestellten mathematischen Modells. Es ist festgestellt, dass es auf der Grundlage der erhaltenen Näherungsabhängigkeiten der Reibungskoeffizienten von der angelegten Spannung möglich ist, die Werte des Stoffflusses durch die Ionenaustauschmembran zu finden, die zur Vorhersage der kinetischen Eigenschaften und Berechnung der Elektromembrananlagen verwendet werden.

Calcul et prévision des paramètres cinétiques du transfert de masse à travers les membranes échangeuses d'ions à la base de la théorie de la friction

Résumé: Sont effectués le calcul et la prédiction des paramètres cinétiques du processus de la séparation des solutions à l'aide d'un modèle mathématique avancé décrivant le transfert de masse par échange d'ions lors de l'application de l'électrodialyse. Il est établi qu'avec l'augmentation du potentiel électrique, les valeurs du coefficient de friction f_{+m} pour toutes les solutions étudiées augmentent, ce qui varie de 5 à 20 % sur toute la plage de tension appliquée au système membranaire. Le rapport entre les coefficients de friction calculés et les données expérimentales sur les concentrations de solutés dans la chambre de diluat a montré que le modèle présenté est adéquat. Est établi que, selon les dépendances approximatives des coefficients de friction sur la contrainte appliquée, il est possible de trouver les valeurs du flux de matière à travers la membrane échangeuse d'ions, utilisées pour prédire les caractéristiques cinétiques et calculer les installations électroembranaires.

Автор: ***Шестаков Константин Валерьевич*** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика и инженерная графика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

УДК 577.1
DOI: 10.17277/vestnik.2022.04.pp.637-643

ВЛИЯНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И ФЛАВАНОИДОВ НА МЕТАБОЛИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ *Saccharomyces cerevisiae*

С. Е. Синютина, А. Г. Шубина, Л. В. Розенблюм

Кафедра биохимии и фармакологии, sinjutina_s_e@mail.ru;
ФБГОУ ВО «Тамбовский государственный
университет имени Г. Р. Державина», Тамбов, Россия

Ключевые слова: дрожжи; зимазная активность; марганец; медь; никель; флаванон; халкон.

Аннотация: Исследовано влияние 2',4'-дигидроксихалкона, 2',4'-дигидрокси-5'-циклогексилхалкона, 7-гидроксифлаванона и солей марганца, никеля и меди на процесс спиртового брожения у дрожжей. Показано усиление ингибирования ферментации сахарозы при одновременном присутствии флаваноидов и солей тяжелых металлов. Сделано предположение об образовании комплексов халкон–металл, обладающих большей биодоступностью.

Введение

Изучение биологической активности флаваноидных соединений продолжает оставаться актуальным, несмотря на многочисленные исследования в данной области. Это обусловлено существованием многообразных флаваноидов (халконов, флаванонов, флаванолов, ауронов и других), различающихся природой, числом и расположением заместителей в молекулах. Эффекты, проявляемые флаваноидными соединениями, также разнообразны. Биологическое действие флаваноидов характеризуется широким спектром потенциальных мишеней в организме. Они выступают в роли антиоксидантов, могут влиять на активность ферментов, проявлять антибактериальную, противогрибковую, противоопухолевую активность. Представляет интерес изучение биологических эффектов флаваноидов в присутствии солей тяжелых металлов.

Тяжелые металлы, такие как никель, марганец, медь, железо и другие, являются важными микроэлементами, необходимыми для нормального функционирования биологических систем. Они входят в состав ряда ферментов, участвуют в их активации. Однако увеличение концентрации тяжелых металлов в организме приводит к развитию токсичных эффектов. Ионы тяжелых металлов способны связывать сульгидрильные группы белков, вытеснять другие биогенные металлы из их комплексов [1]. В основе токсичности тяжелых металлов также лежит развитие окислительного стресса за счет генерации активных форм кислорода и индукции перекисного окисления липидов [2].

Экспериментально показано негативное влияние высоких концентраций ионов марганца, железа, цинка, ртути, меди, кадмия, кобальта, свинца на скорость процесса биосинтеза этанола при ферментации глюкозы дрожжами *Saccharomyces cerevisiae*, жизнеспособность и рост культуры дрожжей. Наиболее токсичными являются соли ртути и меди [3, 4].

Флаваноиды способны связывать ионы металлов с переменной валентностью, образуя стабильные хелатные комплексы [5]. В зависимости от строения флаваноида образующиеся комплексы могут иметь различную структуру. С наибольшей вероятностью в связывании катионов тяжелых металлов участвуют расположенные рядом гидроксильные и карбонильные группы. Возможность образования комплексных соединений флаваноидов с ионами меди, марганца, цинка с различным соотношением металл : флаваноидный лиганд показано в [6; 7, с. 123].

Металл-флаваноидные комплексы демонстрируют высокую биологическую активность, в частности, за счет снижения вероятности активирования катионами металлов перекисного окисления. При образовании комплексов флаваноидов с катионами металлов может существенно изменяться липофильность флаваноидов, что приводит к изменению их взаимодействия с липидным бислоем. Необходимо отметить, что проникновение флаваноидов через липидный бислой клеточной мембраны происходит либо непосредственно (гидрофобные агликоны), либо при участии переносчиков (водорастворимые гликозиды). Образование комплексов с металлами снижает полярность гидроксильных групп [7, с. 99–100], что в свою очередь приводит к увеличению биодоступности флаваноидов.

Образование комплексов хелатной структуры может существенно влиять на характер биологической активности флаваноидов. Так, комплексы меди с производными флаванона проявляют ингибирующую активность по отношению к ацетилхолинэстеразе [8]. Показана высокая антиоксидантная, антибактериальная и антиопухолевая активность комплексов флаваноидов с ионами редкоземельных металлов [7, с. 121]. Тем не менее механизмы комплексообразования флаваноидов с металлами, а также влияние комплексообразования на биологические эффекты исходных соединений изучены недостаточно.

Методика эксперимента

Исследовано влияние 2',4'-дигидроксихалкона, 2',4'-дигидрокси-5'-циклогексилхалкона, 7-гидроксифлаванона и солей никеля (II), марганца (II), меди (II) на метаболическую активность дрожжей *Saccharomyces cerevisiae.* Субстратом спиртового брожения являлся раствор сахарозы, в который вводили флаваноиды в концентрации 50 мкмоль/л и соли тяжелых металлов (концентрация в рабочем растворе 3 ПДК). Активность синтеза этанола дрожжевыми клетками определяли газометрическим методом [9]. Моделирование молекул халконов и квантово-химические расчеты проводили с использованием программы HyperChem.

Экспериментальные результаты и обсуждение

Флаваноиды в концентрации 50 мкмоль/л замедляют метаболизм дрожжей, что проявляется снижением синтеза этанола и скорости выделения диоксида углерода (рис. 1). Наибольший ингибиторный эффект проявляет 2',4'-дигидроксихалкон, наименьший – 2',4'-дигидрокси-5'-циклогексилхалкон (рис. 1). В присутствии солей тяжелых металлов наблюдается существенное уменьшение скорости спиртового брожения и выделения углекислого газа (рис. 2). Добавление солей меди приводит к практически полному подавлению активности дрожжей.

Для оценки совместного влияния флаваноидов и солей тяжелых металлов на метаболическую активность дрожжей введен коэффициент ингибирования, представляющий отношение объемов углекислого газа, выделившихся за 60 мин при сбраживании реакционной смеси без добавок и с добавками флаваноидов и/или солей тяжелых металлов соответственно. Согласно полученным результатам, при одновременном добавлении флаваноидов и солей никеля ингибирование усиливается, наблюдается суммирование эффектов (рис. 3). В то же время в присутствии солей марганца и халконов торможение спиртового брожения в дрожжевых клетках резко возрастает. Для 7-гидроксифлаванона подобный эффект менее выражен.

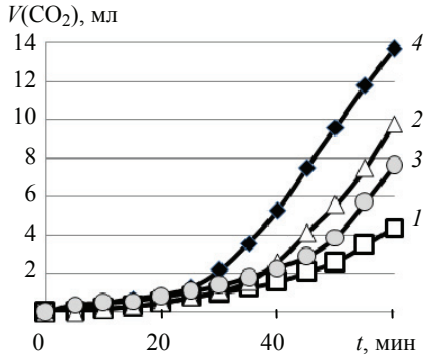


Рис. 1. Зависимость скорости выделения диоксида углерода от присутствия флавоноидов в концентрации 50 мкмоль/л:
1 – 2',4'-дигидроксихалкон;
2 – 2',4'-дигидрокси-5'-циклогексилхалкон;
3 – 7-гидроксифлаванон; *4* – контроль

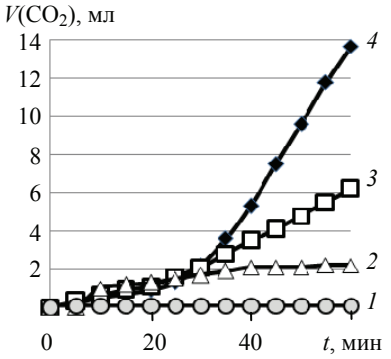


Рис. 2. Зависимость скорости выделения диоксида углерода от присутствия солей тяжелых металлов в концентрации 3 ПДК:
1 – Cu; *2* – Mn; *3* – Ni; *4* – контроль

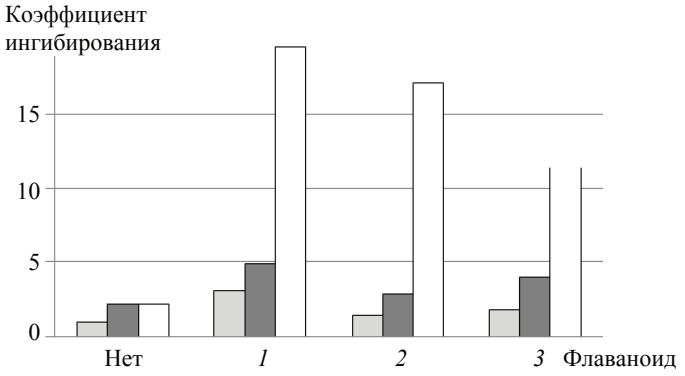


Рис. 3. Зависимость скорости выделения диоксида углерода от присутствия солей тяжелых металлов в концентрации 3 ПДК и 50 мкмоль/л флаваноидов:
1 – 2',4'-дигидроксихалкон; *2* – 2',4'-дигидрокси-5'-циклогексилхалкон;
3 – 7-гидроксифлаванон; ☐ – нет; ■ – Ni; □ – Mn

Данный эффект можно объяснить образованием комплексов ионов марганца (II) и халконов. Если образование комплексных соединений 7-гидроксифлаваноном маловероятно, то наличие гидроксильной и карбонильной групп в молекулах халконов делает возможным их участие в комплексообразовании. Комплексообразование увеличивает липофильность и биодоступность флаваноидов и может усиливать их эффекты [10].

Проведена оптимизация геометрии и рассчитаны некоторые молекулярно-динамические характеристики (энергия молекулы E, энергии высшей занятой молекулярной орбитали E (**ВЗМО**) и низшей вакантной молекулярной орбитали E (**НВМО**), дипольный момент D, заряды на атомах) молекул 2',4'-дигидроксихалкона и 2',4'-дигидрокси-5'-циклогексилхалкона методом MNDO (программа HyperChem). С учетом конформации молекул, полученных данным методом (рис. 4), можно предположить образование комплексов халкон–марганец, в которых лигандами будут выступать халконы, анионы соли, а также молекулы растворителя (рис. 5).

Халкон, имеющий большие отрицательные заряды на атомах кислорода гидроксильной и карбонильной групп (табл. 1), меньший дипольный момент, а также характеризующийся более отрицательным значением E (ВЗМО) (табл. 2), по всей видимости, более склонен к комплексообразованию.

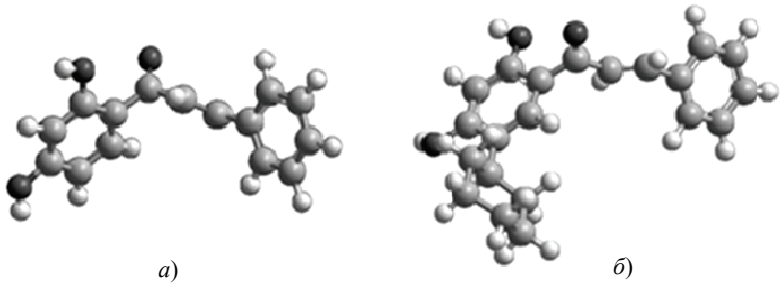


Рис. 4. Модели молекул 2',4'-дигидроксихалкона (*а*) и 2',4'-дигидрокси-5'-циклогексилхалкона (*б*)

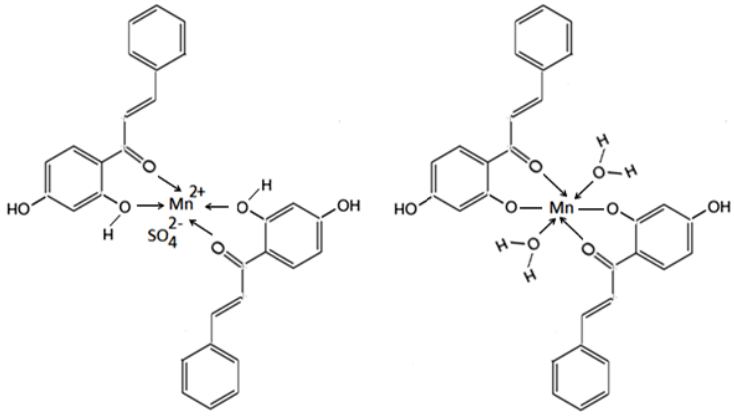


Рис. 5. Возможные структуры комплексов 2',4'-дигидроксихалкон–марганец

Таблица 1

Заряды на атомах молекул халконов

Соединение	Заряд на атомах групп, eV			
	–OH			=C=O
	O	H	Z(H) – Z(O)	O
2',4'-диоксихалкон	–0,254 –0,268	0,231 0,204	0,485 0,472	–0,364 –0,299
5'-циклогексил-2',4'-диоксихалкон	–0,248 –0,238	0,210 0,197	0,458 0,435	–0,305 –0,291

Примечание. Числитель – оптимизация геометрии, знаменатель – молекулярная динамика.

Таблица 2

Молекулярно-динамические характеристики молекул халконов

Соединение	Энергия, ккал/моль	Дипольный момент D	E (НВМО), eV	E (ВЗМО), eV
2',4'-диоксихалкон	–3378,4	2,308	–0,4156196	–9,129087
5'-циклогексил-2',4'-диоксихалкон	–4914,8	3,925	–0,5541747	–8,780964

Выводы

Флаваноиды 2',4'-дигидроксихалкон, 2',4'-дигидрокси-5'-циклогексилхалкон, 7-гидроксифлаванон подавляют метаболическую активность дрожжей. Ингибирующее влияние флаваноидов усиливается в присутствии солей тяжелых металлов. Наиболее эффективна комбинация 2',4'-дигидроксихалкона с солями марганца (II). Высказано предположение, что данный эффект объясняется образованием комплекса халкон–марганец, что увеличивает биодоступность как халкона, так и тяжелого металла.

Список литературы

1. Химические основы токсического действия тяжелых металлов (обзор) / С. Г. Скугорева, Т. Я. Ашихмина, А. И. Фокина, Е. И. Лялина // Теоретическая и прикладная экология. – 2016. – № 1.– С. 4 – 13.

2. Heavy Metal-Induced Oxidative Stress in Algae / T. C. S. Sigaud-Kutner, M. A. S. Leitao, O. K. Okamoto [et al.] // Journal of Phycology. – 2003. – Vol. 39, No. 6. – P. 1008 – 1018. doi: 10.1111/j.0022-3646.2003.02-193.x

3. Энкениколай, П. В. Влияние катионов некоторых металлов на динамику ферментации глюкозы дрожжами *Saccharomyces cerevisiae* W-95 / П. В. Энкениколай, Т. М. Панова, Ю. Л. Юрьев // Вестн. Казанского технологического ун-та. – 2014. – Т. 17, № 6. – С. 213 – 215.

4. Вятчина, О. Ф. Сравнительная оценка чувствительности разных тест-функций *Saccharomyces cerevisiae* к солям тяжелых металлов / О. Ф. Вятчина, Г. О. Жданова, Д. И. Стом // Вестн. Российского ун-та дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2017. – Т. 25, № 2. – С. 206 – 216. doi: 10.22363/2313-2310-2017-25-2-206-216

5. Биологическая активность полифенолов растительного происхождения. Перспектива использования антоцианов в медицинской практике / Д. И. Писарев, О. О. Новиков, О. А.Селютин, Н. А. Писарева // Научные ведомости Белгородского гос. ун-та. Серия: Медицина. Фармация. – 2012. – № 10-2 (129). – С. 17 – 24.

6. Трофимова, Н. Н. Иследование методов синтеза, строения и свойств комплексов флаваноидов с ионами металлов. Сообщение 3. Изучение кинетики реакции комплексообразования меди (II) с дигидрокверцетином в водной среде / Н. Н. Трофимова, Е. В. Столповская, В. А. Бабкин // Химия растительного сырья. – 2013. – № 4. – С. 37 – 43. doi: 10.14258/jcprm.1304037.

7. Флавоноиды: биохимия, биофизика, медицина / Ю. С. Тараховский, Ю. А. Ким, Б. С. Абдрасилов, Е. Н. Музафаров. – Пущино : Synchrobook, 2013. – 310 с.

8. Copper (II) and Zinc (II) Complexes with Flavanone Derivatives: Identification of Potential Cholinesterase Inhibitors by On-Flow Assays / A. L. F. Sarria, A. F. L. Vilela, B. M. Frugeri [et al.] // Journal of Inorganic Biochemistry. – 2016. – Vol. 164. – P. 141 – 149. doi: 10.1016/j.jinorgbio.2016.09.010.

9. Справочник по производству хлебопекарных дрожжей / Под ред. С. С. Новаковской, Ю. И. Шишацкого. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Пищевая промышленность, 1980. – 375 с.

10. Ягольник, Е. А. Мембранотропные и антиоксидантные свойства флавоноидов и их комплексов с катионами железа : автореф. дис. … канд. биол. наук : 03.01.02 / Е. А. Ягольник. – Пущино, 2013. – 25 с.

The Effect of Heavy Metals and Flavanoids on the Metabolic Activity of *Saccharomyces Cerevisiae*

S. E. Sinyutina, A. G. Shubina, L. V. Rosenblum

Department of Biochemistry and Pharmacology, sinjutina_s_e@mail.ru; Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russia

Keywords: yeast; zymase activity; manganese; copper; nickel; flavanone; chalcon.

Abstract: The effect of 2',4'-dihydroxychalcone, 2',4'-dihydroxy-5'-cyclohexylchalcone, 7-hydroxyflavanone and salts of manganese, nickel and copper on the process of alcoholic fermentation in yeast was studied. An increase in the inhibition of sucrose fermentation was shown with the simultaneous presence of flavonoids and salts of heavy metals. An assumption was made about the formation of chalcone-metal complexes with greater bioavailability.

References

1. Skugoreva S.G., Ashikhmina T.Ya., Fokina A.I., Lyalina Ye.I. [Chemical bases of the toxic action of heavy metals (review)], *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* [Theoretical and applied ecology], 2016, no. 1, pp. 4-13. (In Russ., abstract in Eng.)

2. Sigaud-Kutner T.C.S., Leitao M.A.S., Okamoto O.K., Morse D., Colepicolo P. Heavy Metal-Induced Oxidative Stress in Algae, *Journal of Phycology*, 2003, vol. 39, no. 6, pp. 1008-1018, doi: 10.1111/j.0022-3646.2003.02-193.x

3. Enkenikolay P.V., Panova T.M., Yur'yev Yu.L. [Influence of cations of some metals on the dynamics of glucose fermentation by yeast *Saccharomyces cerevisiae* W-95], *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University], 2014, vol. 17, no. 6, pp. 213-215. (In Russ., abstract in Eng.)

4. Vyatchina O.F., Zhdanova G.O., Stom D.I. [Comparative assessment of the sensitivity of different test functions of *Saccharomyces cerevisiae* to salts of heavy metals], *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Ecology and life safety], 2017, vol. 25, no. 2, pp. 206-216, doi: 10.22363/2313-2310-2017-25-2-206-216 (In Russ., abstract in Eng.)

5. Pisarev D.I., Novikov O.O., Selyutin O.A., Pisareva N.A. [Biological activity of polyphenols of plant origin. The prospect of using anthocyanins in medical practice], *Nauchnyye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Meditsina. Farmatsiya* [Scientific Bulletin of the Belgorod State University. Series: Medicine. Pharmacy], 2012, no. 10-2 (129), pp. 17-24. (In Russ.)

6. Trofimova N.N., Stolpovskaya Ye.V., Babkin V.A. [Investigation of methods of synthesis, structure and properties of complexes of flavanoids with metal ions. Communication 3. Study of the kinetics of the reaction of complex formation of copper (II) with dihydroquercetin in an aqueous medium], *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of vegetable raw materials], 2013, no. 4, pp. 37-43, doi: 10.14258/jcprm.1304037. (In Russ.)

7. Tarakhovskiy Yu.S., Kim Yu.A., Abdrasilov B.S., Muzafarov Ye.N. *Flavonoidy: biokhimiya, biofizika, meditsina* [Flavonoids: biochemistry, biophysics, medicine], Pushchino: Sunchrobook, 2013, 310 p. (In Russ.)

8. Sarria A.L.F., Vilela A.F.L., Frugeri B.M. [et al.] Copper (II) and Zinc (II) Complexes with Flavanone Derivatives: Identification of Potential Cholinesterase Inhibitors by On-Flow Assays, *Journal of Inorganic Biochemistry*, 2016, vol. 164, pp. 141-149, doi: 10.1016/j.jinorgbio.2016.09.010.

9. Novakovskaya S.S., Shishatskiy Yu.I. [Eds.] *Spravochnik po proizvodstvu khlebopekarnykh drozhzhey* [Handbook for the production of baker's yeast], Moscow: Pishchevaya promyshlennost', 1980, 375 p. (In Russ.)

10. Yagol'nik Ye.A. *Extended abstract of candidate's of biological thesis*, Pushchino, 2013, 25 p. (In Russ.)

Auswirkungen von Schwermetallen und Flavonoiden auf die metabolische Aktivität von *Saccharomyces cerevisiae*

Zusammenfassung: Es ist die Wirkung von 2',4'-Dihydroxychalcon, 2',4'-Dihydroxy-5'-cyclohexylchalcon, 7-Hydroxyflavanon und Mangan-, Nickel- und Kupfersalzen auf den Prozess der alkoholischen Gärung in Hefe untersucht. Es ist gezeigt, dass die Fermentation von Saccharose bei gleichzeitiger Anwesenheit von Flavonoiden und Schwermetallsalzen verstärkt wird. Es ist eine Annahme über die Bildung von Chalcon-Metall-Komplexen mit größerer Bioverfügbarkeit gemacht.

Influence des métaux lourds et des flavonoïdes sur l'activité métabolique *de Saccharomyces cerevisiae*

Résumé: Est étudiée l'influence de la 2',4'-dihydroxychalcone, 2',4'-dihydroxy-5'-cyclohexylchalcone, 7-hydroxyflavanone et des sels de manganèse, de nickel et le cuivre sur le processus de la fermentation alcoolique dans la levure. Est montrée une inhibition accrue de la fermentation du saccharose avec la présence simultanée des flavonoïdes et des sels de métaux lourds. Est faite une hypothèse sur la formation des complexes chalcone-métal métal, ayant la plus grande biodisponibilité.

Авторы: ***Синютина Светлана Евгеньевна*** – кандидат химических наук, доцент, заведующий кафедрой биохимии и фармакологии; ***Шубина Анна Геннадиевна*** – кандидат химических наук, доцент кафедры биохимии и фармакологии; ***Розенблюм Людмила Васильевна*** – старший преподаватель кафедры биохимии и фармакологии, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина», Тамбов, Россия.

УДК 517.518
DOI: 10.17277/vestnik.2022.04.pp.644-661

ДВА КЛАССА ОПЕРАТОРОВ СВЕРТКИ В ВЕСОВЫХ ЛЕБЕГОВЫХ ПРОСТРАНСТВАХ

Б. П. Осиленкер, А. Д. Нахман

Кафедра «Высшая математика», alextmb@mail.ru;
ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия

Ключевые слова: аппроксимативные единицы; максимальные оценки; операторы свертки; средние рядов Фурье и сопряженных рядов.

Аннотация: Рассмотрены два класса операторов свертки, порожденных функциями из весовых лебеговых пространств. В терминах условий на коэффициенты Фурье семейств интегральных ядер установлены максимальные оценки весовых L^p-норм операторов свертки сильного ($p>1$) и слабого ($p\ge 1$) типа. Предложены теоремы сходимости; построены аппроксимативные единицы в соответствующей *-алгебре. Полученные результаты перенесены на семейства линейных средних рядов Фурье и сопряженных рядов. Рассмотрены, в частности, экспоненциальные методы суммирования и их приложения к обобщенным дробным интегралам.

1. Обозначения. Семейства средних ряда Фурье и сопряженного ряда

Пусть $L_\nu^p = L_\nu^p(Q)$ – класс измеримых на $Q=(-\pi,\pi]$ 2π-периодических функций f, таких что

$$\| f \|_{\nu,p} = \left(\int_Q | f(x) |^p \ \nu(x)dx \right)^{1/p} < \infty , \quad p \ge 1 .$$

Здесь весовая функция $v = v(x) \ge 0$ также измерима на $Q=(-\pi,\pi]$ и 2π-периодична; в случае $v \equiv 1$ имеем классические лебеговы пространства $L^p = L^p(Q)$; $L = L^1(Q)$. Положим

$$A_p(\nu; I) = \left(\frac{1}{|I|} \int_I \nu(t)dt \right) \left(\frac{1}{|I|} \int_I \nu^{-1/(p-1)}(t)dt \right)^{p-1}, \quad p \ge 1,$$

где I – произвольный интервал, а множитель $\left(\int_I \nu^{-1/(p-1)}(t)dt \right)^{p-1}$ считается по определению равным $\operatorname{esssup}_{t\in I} \dfrac{1}{\nu(t)}$ при $p=1$.

Говорят, что выполнено A_p-условие Розенблюма–Макенхоупта [1, 2] и применяют обозначение $\nu \in A_p$, если $\sup\limits_I A_p(\nu; I) < \infty$, $p \geq 1$. В настоящей работе, как и в [2], полагаем, что $0 \cdot \infty = 0$. Тогда (см. [2])

$$\left(\int_Q \nu^{-1/(p-1)}(t)dt \right)^{p-1} < \infty \quad \text{для} \quad \nu \in A_p \quad (p \geq 1),$$

и можно считать (на основании неравенства Гельдера), что каждая $f \in L_\nu^p(Q)$ является также функцией из класса $L(Q)$.

С помощью весовой функции $\nu = \nu(x) \geq 0$ будет определена мера множеств Ω в виде

$$\mu(\Omega) = \int_\Omega \nu(x)dx .$$

Сопоставим произвольной функции $f \in L(Q)$ последовательность ее коэффициентов Фурье

$$c_k(f) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) \exp(-ikt)\, dt, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots, \tag{1.1}$$

ряд Фурье

$$s[f, x] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k(f) \exp(ikx) \tag{1.2}$$

и сопряженный ряд

$$\tilde{s}[f, x] = -i \sum_{k=-\infty}^{\infty} (\operatorname{sgn} k) c_k(f) \exp(ikx) . \tag{1.3}$$

С помощью бесконечной последовательности

$$\lambda = \{\lambda_k(h), \ k = 0, 1, \ldots\}, \tag{1.4}$$

определяемой значениями параметра $h > 0$, построим два семейства операторов вида:

$$U_h(f) = U_h(f, x; \lambda) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \lambda_{|k|}(h) c_k(f) \exp(ikx) \tag{1.5}$$

и

$$\tilde{U}_h(f) = \tilde{U}_h(f, x; \lambda) = -i \sum_{k=-\infty}^{\infty} (\operatorname{sgn} k) \lambda_{|k|}(h)\, c_k(f) \exp(ikx), \tag{1.6}$$

которые называются также семействами линейных средних ряда Фурье и сопряженного ряда соответственно.

Поведение средних (1.5) при $h \to +0$ (вопросы так называемой λ-суммируемости) в случае дискретных значений параметра h составляло предмет многих исследований (см. [3 – 5] и др.); в меньшей степени изучен случай (1.6).

В настоящей работе рассмотрим следующие вопросы (более точные формулировки будут представлены в текстах соответствующих теорем):

– какие условия на суммирующую последовательность достаточны для ограниченности в $L_{\nu}^{p}(Q)$, $\nu \in A_p$, максимальных операторов, порожденных семействами (1.5), (1.6) и ассоциированных с ними операторов свертки;

– какие условия обеспечивают при $h \to +0$ сходимость (1.5), (1.6) почти всюду и в метрике соответствующего пространства;

– каково поведение семейств обобщенных дробных интегралов ряда Фурье и сопряженного ряда при $h \to +0$.

2. Постановка задач для операторов свертки

Если воспользоваться интегральной формой (1.1) коэффициентов Фурье в представлениях (1.5) и (1.6), и формально выполнить почленное интегрирование получаемых рядов, то приходим к рассмотрению следующих двух семейств операторов свертки:

$$f * K_h = (f * K_h)(x) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(t)\, K_h(x-t)dt \tag{2.1}$$

и

$$f * \tilde{K}_h = (f * \tilde{K}_h)(x) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(t)\, \tilde{K}_h(x-t)dt\ , \tag{2.2}$$

где

$$K_h(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \lambda_{|k|}(h)\exp(ikx)\,; \tag{2.3}$$

$$\tilde{K}_h(x) = -i\sum_{k=-\infty}^{\infty} (\operatorname{sgn} k)\lambda_{|k|}(h)\exp(ikx)\,. \tag{2.4}$$

Теперь сформулированные выше задачи (возможно, уже вне связи с вопросами суммируемости рядов (1.2) и (1.3)) могут быть переформулированы в терминах таких условий на коэффициенты Фурье функций $K_h(x)$ и $\tilde{K}_h(x)$, которые, в частности, обеспечат сходимость рядов (2.3), (2.4) почти всюду и ограниченность операторов свертки (2.1) и (2.2) в весовых лебеговых пространствах $L_{\nu}^{p} = L_{\nu}^{p}(Q)$.

Перечислим вышеупомянутые условия, которым на протяжении всей работы будет удовлетворять последовательность (1.4). Для этого положим $\Delta\lambda_k(h) = \lambda_k(h) - \lambda_{k+1}(h),\ \Delta\lambda_k^2(h) = \Delta(\Delta\lambda_k(h)),\ k = 0, 1, ...,$ и

$$\sum(\lambda, h) = \sum_{k=0}^{\infty}(k+1)\,|\,\Delta^2\lambda_k(h)\,|\,.$$

Последовательность (1.4) называется квазивыпуклой [6, т. 1, с. 135], если $\sum(\lambda, h) < \infty$ при каждом $h > 0$. Будем говорить, что (1.4) равномерно квазивыпукла, если существует постоянная $C = C_{\lambda}$, такая что

$$\sum{}^*(\lambda) = \sup_{h>0}\sum(\lambda, h) \le C_{\lambda}\,. \tag{2.5}$$

Здесь и в дальнейшем через C обозначаем постоянные, вообще говоря, различные и зависящие лишь от указанных явно индексов или же (при отсутствии индексов) абсолютные постоянные.

Для (1.4), как последовательности коэффициентов Фурье функций (2.3), естественно потребовать, чтобы при каждом $h > 0$

$$\lim_{N \to +\infty} \lambda_N(h) = 0. \tag{2.6}$$

Будем также для определенности считать, что

$$\lambda_0(h) = 1. \tag{2.7}$$

3. Преобразования интегральных ядер

Выразим интегральные ядра (2.3), (2.4) через стандартные ядра:
– ядро Фейера

$$F_k(t) = \frac{1}{k+1} \sum_{\nu=0}^{k} D_\nu(t) = \frac{\sin^2 \frac{k+1}{2} t}{2(k+1)\sin^2 \frac{1}{2} t};$$

– сопряженное ядро

$$\tilde{F}_k(t) = \frac{1}{k+1} \sum_{\nu=0}^{k} \tilde{D}_\nu(t) = \frac{1}{2tg\frac{1}{2}t} - \tilde{\tilde{F}}_k(t), \tag{3.1}$$

$$D_k(t) = \frac{1}{2} + \sum_{\nu=1}^{k} \cos \nu t = \frac{\sin\left(k + \frac{1}{2}\right)t}{2\sin\frac{1}{2}t};$$

– ядро Дирихле

$$\tilde{D}_k(t) = \sum_{\nu=1}^{k} \sin \nu t = \frac{1}{2tg\frac{1}{2}t} - \frac{\cos\left(k + \frac{1}{2}\right)t}{2\sin\frac{1}{2}t}; \tag{3.2}$$

– сопряженное ядро Дирихле, $D_0(t) = \tilde{D}_0(t) \equiv 0$ и

$$\tilde{\tilde{F}}_k(t) = \frac{\sin(k+1)t}{4(k+1)\sin^2 \frac{1}{2} t}, \tag{3.3}$$

где $k = 0, 1, \ldots$, (см. [7, т. 1, с. 86, 148, 153]).

Лемма 3.1. Пусть $\delta > 0$ – произвольно малое фиксированное число и выполнены условия (2.5) – (2.7). Тогда при всех $t \in [-\pi, \pi] \setminus (-\delta, \delta)$ и $h > 0$ имеют место соотношения:

$$K_h(t) = \sum_{k=0}^{\infty} (k+1)\Delta^2 \lambda_k(h)\ F_k(t)\ ; \tag{3.4}$$

$$\tilde{K}_h(t) = \sum_{k=0}^{\infty}(k+1)\Delta^2\lambda_k(h)\ \tilde{F}_k(t)\ , \tag{3.5}$$

причем ряды (3.4), (3.5) сходятся абсолютно и равномерно.

Утверждение (3.4) установлено в [8], докажем (3.5). Запишем (см. (3.2))

$$\tilde{K}_h(t) = \lim_{N\to+\infty}\left(\sum_{k=1}^{N}\lambda_k(h)(\tilde{D}_k(t) - \tilde{D}_{k-1}(t))\right)$$

и применим к сумме под знаком предела преобразование Абеля

$$\tilde{K}_h(t) = \lim_{N\to+\infty}\left(\lambda_N(h)\tilde{D}_N(t) + \sum_{k=0}^{N-1}\Delta\lambda_k(h)\tilde{D}_k(t)\right). \tag{3.6}$$

Согласно (2.6) и очевидному при $\delta \le |t| \le \pi$ неравенству

$$|\tilde{D}_k(t)| \le \frac{C}{|t|} \le \frac{C}{\delta}\ ,\ \ k = 0, 1, ...,$$

(3.6) при каждом $h > 0$ принимает вид

$$\tilde{K}_h(t) = \sum_{k=0}^{\infty}\Delta\lambda_k(h)\tilde{D}_k(t)\,. \tag{3.7}$$

Далее, в силу известной оценки ([6, т. 1, с. 135–136; 8])

$$\sum_{k=0}^{\infty}|\Delta\lambda_k(h)| \le \sum(\lambda, h)\,,$$

ряд (3.7) абсолютно и равномерно сходится при $\delta \le |t| \le \pi$.

Легко проверить, что (см. (3.1), (3.3))

$$\tilde{D}_k(t) = (k+1)\tilde{F}_k(t) - k\tilde{F}_{k-1}(t)\ ,\ \ k = 0, 1, ...,$$

а значит, применяя преобразования Абеля, будем иметь

$$\tilde{K}_h(t) = \lim_{N\to+\infty}\sum_{k=0}^{N}\Delta\lambda_k(h)\ \tilde{D}_h(t) =$$

$$= \lim_{N\to+\infty}\left((N+1)\Delta\lambda_N(h)\tilde{F}_N(t) + \sum_{k=0}^{N-1}(k+1)\Delta^2\lambda_k(h)\tilde{F}_k(t)\right). \tag{3.8}$$

При этом, согласно (3.1) и (3.3), справедливо неравенство

$$|\tilde{F}_k(t)| \le \frac{C}{|t|} \le \frac{C}{\delta},\ \ k = 0, 1, ...:\quad \delta \le |t| \le \pi\,. \tag{3.9}$$

Далее

$$\lim_{N\to+\infty}(N+1)\Delta\lambda_N(h) = 0 \tag{3.10}$$

при каждом $h > 0$, поскольку последовательность (1.4) квазивыпукла (см. (2.5) и [6, т. 1, с. 135–136]).

Теперь, в силу (3.9) и (3.10), в соотношении (3.8) предел первого слагаемого равен нулю, и приходим к утверждению (3.5); условие (2.5) обеспечивает при $\delta \le |t| \le \pi$ абсолютную и равномерную сходимость ряда в (3.5). Ввиду произвольной малости $\delta > 0$ можно также утверждать сходимость почти всюду в Q.

Лемма 3.1 доказана.

4. Максимальные оценки операторов свертки

В настоящем параграфе мы получаем оценки (2.1) и (2.2) в терминах стандартных максимальных функций

$$f^* = f^*(x) = \sup_{\eta>0} \frac{1}{\eta} \int_{x-\eta}^{x+\eta} |f(t)|\, dt \tag{4.1}$$

и

$$Tf = Tf(x) = \sup_{\eta>0} \Big| \int_{\eta \le |t| \le \pi} \frac{f(x+t)}{2 \operatorname{tg} \frac{t}{2}} dt \Big|, \tag{4.2}$$

где $f \in L(Q)$. В этом случае функции (4.1), (4.2) существуют для почти всех x.

Удобно будет записать (2.2) в виде

$$(f * \tilde{K}_h)(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t)\, \tilde{K}_h(x-t) dt = -\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x+t)\, \tilde{K}_h(t) dt\,,$$

что возможно ввиду нечетности (см. (3.1) и (3.2)) ядра $\tilde{K}_h(t)$ и 2π-периодичности подинтегральной функции.

Лемма 4.1. Если выполнены условия (2.5) – (2.7), то при каждом $0 < \delta < \pi$ и почти всех $x \in Q$ (а именно, где соответствующие максимальные функции существуют) имеют место оценки

$$\int_{\delta \le |t| \le \pi} |f(x+t)|\, |K_h(t)|\, dt \le C \sum{}^*(\lambda)\big(f^*(x)\big); \tag{4.3}$$

$$\Big| \int_{\delta \le |t| \le \pi} f(x+t)\, \tilde{K}_h(t) dt \Big| \le C \sum{}^*(\lambda)\big(f^*(x) + Tf(x)\big) \tag{4.4}$$

с постоянной $C > 0$, не зависящей от x и $\delta \in (0, \pi)$.

Доказательство. Докажем (4.4); доказательство (4.3) аналогично (и даже проще) (см. [8]).

Воспользуемся представлением (3.5) ядра в интеграле (4.4) и выполним почленное интегрирование, что возможно по причине равномерной сходимости ряда (3.5) при $\delta \le |t| \le \pi$. Получим

$$\Big| \int_{\delta \le |t| \le \pi} f(x+t)\, \tilde{K}_h(t) dt \Big| =$$

$$= \Big| \sum_{k=0}^{\infty} (k+1) \Delta^2 \lambda_k(h) \int_{\delta \le |t| \le \pi} f(x+t)\, \tilde{F}_k(t) dt \Big| \le \sum_{k=0}^{\infty} |\Delta^2 \lambda_k(h)|\, (k+1) \Big| \int_{\delta \le |t| \le \pi} f(x+t)\, \tilde{F}_k(t) dt \Big|. \tag{4.5}$$

Достаточно теперь установить, что

$$\left| \int\limits_{\delta \le |t| \le \pi} f(x+t)\tilde{F}_k(t)dt \right| \le C(f^*(x) + Tf(x)) \tag{4.6}$$

с постоянной $C > 0$, не зависящей от x, $k = 0, 1, \ldots$ и $\delta \in (0, \pi)$. Возможны следующие два случая.

Случай 1: $0 < \delta \le \dfrac{1}{k+1}$. Тогда

$$\left| \int\limits_{\delta \le |t| \le \pi} f(x+t)\tilde{F}_k(t)dt \right| =$$

$$= \left| \int\limits_{\delta \le |t| \le \frac{1}{k+1}} f(x+t)\tilde{F}_k(t)dt + \int\limits_{\frac{1}{k+1} \le |t| \le \pi} f(x+t)\frac{1}{2}\mathrm{ctg}\frac{t}{2}dt + \int\limits_{\frac{1}{k+1} \le |t| \le \pi} f(x+t)\tilde{\tilde{F}}_k(t)dt \right| =$$

$$= |J_1 + J_2 + J_3|. \tag{4.7}$$

Далее

$$|J_1| \le \int\limits_{0 \le |t| \le \frac{1}{k+1}} |f(x+t)||\tilde{F}_k(t)|\,dt \le C f^*(x); \tag{4.8}$$

$$|J_2| \le \sup_{h>0} \left| \int\limits_{h \le |t| \le \pi} f(x+t)\frac{1}{2}\mathrm{ctg}\frac{t}{2}dt \right| = Tf(x); \tag{4.9}$$

$$|J_3| \le \int\limits_{\frac{1}{k+1} \le |t| \le \pi} |f(x+t)||\tilde{\tilde{F}}_k(t)|\,dt \le Cf^*(x); \tag{4.10}$$

здесь оценки (4.8) и (4.10) известны (см., напр., [9]), а оценка (4.9) очевидна.

Итак, в рассматриваемом случае результат (4.6) следует из соотношений (4.7) – (4.10).

Случай 2: $\dfrac{1}{k+1} \le \delta < \pi$. Имеем в силу (4.10)

$$\left| \int\limits_{\delta \le |t| \le \pi} f(x+t)\tilde{F}_k(t)dt \right| =$$

$$= \left| \int\limits_{\delta \le |t| \le \pi} f(x+t)\frac{1}{2}ctg\frac{t}{2}dt + \int\limits_{\delta \le |t| \le \pi} f(x+t)\tilde{\tilde{F}}_k(t)dt \right| \le Tf(x) + \int\limits_{\frac{1}{k+1} \le |t| \le \pi} |f(x+t)||\tilde{\tilde{F}}_k(t)|\,dt \le$$

$$\le Tf(x) + Cf^*(x),$$

и снова приходим к (4.6).

Утверждение (4.4) леммы теперь вытекает из (4.5), (4.6).

Лемма 4.2. Если выполнены условия (2.5) – (2.7), то для почти всех $x \in Q$ имеют место оценки:

$$\int_Q |f(x+t)||K_h(t)|\,dt \le C\sum{}^*(\lambda)\big(f^*(x)\big); \tag{4.11}$$

$$\left|\int_Q f(x+t)\ \tilde{K}_h(t)dt\right| \le C\sum{}^*(\lambda)\big(f^*(x)+Tf(x)\big). \tag{4.12}$$

Для доказательства (4.11) и (4.12) достаточно перейти в соотношениях (4.3) и (4.4) соответственно к пределу при $\delta \to +0$.

Заметим, в частности, что при выполнении условий (2.5) – (2.7) каждая из функций $K_h(t)$, $h>0$, принадлежит классу $L(Q)$, в чем легко убедиться, если взять в (4.11) $f \equiv 1$ на Q.

5. Весовые оценки операторов свертки

Положим

$$(f*K)_* = (f*K)_*(x) = \sup_{h>0}|(f*K_h)(x)|;$$

$$(f*\tilde{K})_* = (f*\tilde{K})_*(x) = \sup_{h>0}|(f*\tilde{K}_h)(x)|.$$

Поскольку правые части (4.11) и (4.12) не зависят от h, то для почти всех $x \in Q$ будут справедливы неравенства:

$$(f*K)_*(x) \le C\sum{}^*(\lambda)\big(f^*(x)\big); \tag{5.1}$$

$$(f*\tilde{K})_*(x) \le C\sum{}^*(\lambda)\big(f^*(x)+Tf(x)\big). \tag{5.2}$$

Теорема 5.1. Пусть элементы последовательности (1.4) удовлетворяют условиям (2.5) – (2.7).

1) если $\nu \in A_p$, $p>1$, то имеют место оценки:

$$\|(f*K)_*\|_{\nu,p} \le C_{\nu,p}\|f\|_{\nu,p}; \tag{5.3}$$

$$\|(f*\tilde{K})_*\|_{\nu,p} \le C_{\nu,p}\|f\|_{\nu,p}. \tag{5.4}$$

2) если $\nu \in A_p$, $p \ge 1$, то справедливы соотношения:

$$\mu\{x \in Q \mid (f*K)_*(x) > \varsigma > 0\} \le C_{\nu,p}\left(\frac{\|f\|_{\nu,p}}{\varsigma}\right)^p; \tag{5.5}$$

$$\mu\{x \in Q \mid (f*\tilde{K})_*(x) > \varsigma > 0\} \le C_{\nu,p}\left(\frac{\|f\|_{\nu,p}}{\varsigma}\right)^p. \tag{5.6}$$

Доказательство. Согласно результатам [2, 10], каждая из оценок «сильного типа»:

$$\|f^*\|_{\nu,p} \le C_{\nu,p}\|f\|_{\nu,p}; \tag{5.7}$$

$$\|Tf\|_{\nu,p} \le C_{\nu,p}\|f\|_{\nu,p} \tag{5.8}$$

для максимальных функций (4.1) и (4.2) равносильна условию $\nu \in A_p$, если $p > 1$. Кроме того, каждая из оценок «слабого типа»:

$$\mu\left\{x \in Q \mid f^*(x) > \varsigma > 0\right\} \le C_{\nu,\,p} \left(\frac{\| f \|_{\nu,\,p}}{\varsigma}\right)^p; \tag{5.9}$$

$$\mu\{x \in Q \mid Tf(x) > \varsigma > 0\} \le C_{\nu,\,p} \left(\frac{\| f \|_{\nu,\,p}}{\varsigma}\right)^p \tag{5.10}$$

также равносильна $\nu \in A_p$, $p \ge 1$.

Теперь утверждения (5.3) – (5.6) следуют из оценок (5.1) – (5.2) и результатов (5.7) – (5.10).

6. Вопросы сходимости. Аппроксимативные единицы

Теорема 6.1. Пусть элементы последовательности (1.4) удовлетворяют условиям (2.5) – (2.7) и

$$\lim_{h \to +0} \lambda_k(h) = 1, \qquad k = 0, 1, \ldots. \tag{6.1}$$

Тогда соотношения:

$$\lim_{h \to +0} f * K_h = f \tag{6.2}$$

и

$$\lim_{h \to +0} f * \tilde{K}_h = \tilde{f}$$

имеют место:

а) в метрике каждого из пространств $L^p_\nu(Q)$, $\nu \in A_p$, $p > 1$;

б) μ-почти всюду для любой $f \in L^p_\nu(Q)$, $\nu \in A_p$, $p \ge 1$.

Кроме того, соотношение (6.2) справедливо также в метрике $L^1_\nu(Q)$, $\nu \in A_1$.

Доказательство. Утверждение пункта а) вытекает стандартным образом из теоремы Банаха–Штейнгауза, если воспользоваться условием (6.1) и оценками сильного типа (5.3)–(5.4). Сходимость (6.2) в метрике $L^1_\nu(Q)$ устанавливается рассуждениями, аналогичными [2, теорема 10; 8].

Утверждение пункта б) вытекает также стандартным образом из (6.1) и оценок слабого типа (5.5), (5.6) (см. [7, т. 2, с. 464–465]).

Результат теоремы 6.1 может быть интерпретирован следующим образом. При $\nu \in A_p$, $p \ge 1$, операторы (2.1) и (2.2) задают на $L^p_\nu(Q)$, две $*$-алгебры. В частности, алгебра, порожденная на L оператором $f * K_h$, коммутативна, поскольку каждая $K_h(x) \in L(Q)$ (см. замечание к лемме 2.2).

В случае $f * K_h$ соответствующая алгебра на $L^p_\nu(Q)$, $p \ge 1$, не содержит, вообще говоря, единицы относительно операции свертки (этот факт для пространств $L^p(Q)$, $p \ge 1$ (см. [6, т. 1, с. 68, 75])). Поэтому повышается интерес к так называемым аппроксимативным единицам, то есть семействам операторов, которые аппроксимируют единичный оператор E: $Ef = f$. Согласно (6.2), при выполнении условий (2.5) – (2.7) и (6.1), семейство $\{f * K_h\}$, $h > 0$, служит аппроксимативной единицей (аппроксимация E в метрике $L^p_\nu(Q)$ и μ-почти всюду).

7. Средние рядов Фурье и сопряженных рядов

Уточним анонсированные выше (в п. 2, где речь шла о формальном почленном интегрировании рядов) связи средних (1.5) рядов Фурье с операторами свертки (2.1) и сопряженных средних (1.6) с (2.2).

Для квазивыпуклой последовательности (1.4), согласно формуле Парсеваля [3 – 5], имеют место соотношения:

$$U_h(f, x; \lambda) = (f * K_h)(x); \tag{7.1}$$

$$\tilde{U}_h(f, x; \lambda) = (f * \tilde{K}_h)(x); \tag{7.2}$$

при этом условие

$$|\lambda_k(h)| \ln(k+1) \le C_h, \qquad h > 0, \tag{7.3}$$

является необходимым и достаточным для сходимости почти всюду рядов, записанных в левых частях (7.1) и (7.2). Значит, при дополнительном условии (7.3), теоремы 5.1 и 6.1 можно переформулировать в терминах средних (1.5), (1.6).

Впрочем, соответствующие результаты могут быть установлены непосредственно, то есть без использования (7.1), (7.2) [11].

Более того, справедлива

Теорема 7.1. Пусть элементы последовательности (1.4) удовлетворяет условиям (2.5) – (2.7). Пусть также $\nu \in A_p$.

1) Следующие оценки сохраняются с заменой $(f * K)_*$ на $\sup\limits_{h>0} |U_h(f, x; \lambda)|$:

1а) оценка сильного типа (5.3) при $p > 1$;

1б) оценка слабого типа (5.4) при $p = 1$ и выполнении условия (7.3).

2) Если, кроме того, элементы последовательности (1.4) удовлетворяют условию (6.1) и $f \in L^p_\nu(Q)$, то соотношение

$$\lim_{h \to +0} U_h(f) = f$$

имеет место:

2а) в метрике $L^p_\nu(Q)$ и μ-почти всюду при $p > 1$;

2б) μ-почти всюду при $p = 1$ и выполнении условия (7.3).

Замечание. В рассматриваемом круге вопросов при $p = 1$ условие (7.3), вообще говоря, снять нельзя. Покажем это в случае $\nu \equiv 1$. Пусть $\Upsilon \subset Q$ – множество всех точек λ-суммируемости (о которых идет речь в теореме 7.1) ряда Фурье функции $f \in L$, а $\Lambda \subset Q$ – множество всех точек Лебега этой функции. Тогда $\Upsilon \cap \Lambda$ расположено почти всюду в Q, и в каждой из точек $\Upsilon \cap \Lambda$, согласно теореме 7.1, ряд Фурье λ-суммируем к $f(x)$. В этих же точках ([5], случай дискретных значений параметра h, $h \to +0$) условие (7.3) оказывается необходимым и достаточным для такой суммируемости, что и утверждалось.

В случае средних сопряженного ряда Фурье справедлива

Теорема 7.2. Пусть элементы последовательности (1.4) удовлетворяют условиям (2.5) – (2.7) и (7.3). Пусть также $\nu \in A_p$.

1) Оценки сильного типа (5.4) при $p > 1$ и слабого типа (5.6) при $p \ge 1$ имеют место с заменой $(f * \tilde{K})_*$ на $\sup\limits_{h>0} |\tilde{U}_h(f, x; \lambda)|$.

2) Если, кроме того, выполнено условие (6.1), то соотношение

$$\lim_{h\to+0} \tilde{U}_h(f) = \tilde{f}$$

имеет место:

2а) в метрике $L^p_\nu(Q)$, $p>1$;

2б) μ-почти всюду для любой $f \in L^p_\nu(Q)$, $p \ge 1$.

Доказательство теоремы 7.1. Достаточно установить оценку (аналогичную (5.1))

$$\sup_{h>0} |U_h(f, x; \lambda)| \le C\sum{}^*(\lambda)\big(f^*(x)\big); \tag{7.4}$$

в остальном повторяются рассуждения, примененные в доказательствах теорем 5.1 и 6.1. Используя (1.5), ядра Дирихле и Фейера, введенные в п. 3, и дважды преобразование Абеля, получаем

$$U_h(f, x; \lambda) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \lambda_{|k|}(h) c_k(f) \exp(ikx) =$$

$$= \lim_{N\to+\infty} \left\{ \lambda_N(h) \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x+t) D_N(t)\, dt + N\Delta\lambda_{N-1}(h) \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x+t) F_{N-1}(t)\, dt + \right.$$

$$\left. + \sum_{k=0}^{N-2} (k+1) \Delta^2 \lambda_k(h) \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x+t) F_k(t)\, dt \right\}. \tag{7.5}$$

Далее, записанные в правой части (7.5) свертки функции f с ядрами Дирихле и Фейера представляют собою, соответственно, последовательности частичных сумм $\{s_k[f, x]\}$ ряда (1.2) и его средних Фейера $\{\sigma_k[f, x]\}$ [7, т. 1, с. 86, 143, 148]. Следовательно,

$$|U_h(f, x; \lambda)| \le \lim_{N\to+\infty} \left\{ |\lambda_N(h)| \sup_{k=0,1,\ldots} |s_k[f, x]| + \left(|N\Delta\lambda_{N-1}(h)| + \right.\right.$$

$$\left.\left. + \sum_{k=0}^{N-2} (k+1) |\Delta^2 \lambda_k(h)| \right) \sup_{k=0,1,\ldots} |\sigma_k[f, x]| \right\}. \tag{7.6}$$

Как установлено в работе [12], для $s^*(f) = s^*(f, x) = \sup\limits_{k=0,1,\ldots} |s_k[f, x]|$ имеет место оценка

$$\| s^*(f) \|_{\nu, p} \le C_{\nu, p} \| f \|_{\nu, p}, \text{ если } \nu \in A_p \text{ и } p > 1.$$

В частности, функция $s^*(f, x)$ конечна почти всюду, а значит, в силу (2.6), предел (при $N \to +\infty$) первого слагаемого в правой части (7.6) равен нулю для почти всех $x \in Q$. Хорошо известно (см., напр., [2]) также соотношение

$$\sup_{k=0,1,\ldots} |\sigma_k[f, x]| \le Cf^*(x),$$

выполненное почти всюду в Q. Теперь, согласно (3.10), неравенство (7.6) для почти всех $x \in Q$ принимает вид

$$|U_h(f, x; \lambda)| \le C\left(\sum_{k=0}^{\infty}(k+1)\,|\Delta^2\lambda_k(h)|\right)f^*(x),$$

чем и доказано (7.4).

Доказательство теоремы 7.2 вытекает из оценки

$$\sup_{h>0}\left|\tilde{U}_h(f, x; \lambda)\right| \le C\sum{}^*(\lambda)\big(f^*(x) + Tf(x)\big),$$

справедливой (см. [9], соотношение (3.2)) для почти всех $x \in Q$ при выполнении условий (2.5) – (2.7) и (7.3). Дальнейшие рассуждения опираются на оценки (5.7), (5.8) и аналогичны рассуждениям, использованным в доказательстве теорем 5.1 и 6.1.

8. Случай экспоненциальной суммирующей последовательности

В настоящем пункте ограничимся случаем

$$\lambda_k(h) = \exp(-h\varphi(k)),\ k = 1, 2, \ldots. \tag{8.1}$$

При этом функция $\varphi(x)$ с действительными значениями предполагается возрастающей к $+\infty$ на $[0, +\infty)$, дважды дифференцируемой на $(0, +\infty)$ и $\varphi(0) = 0$.

Теорема 8.1. Если функция

$$h(\varphi'(x))^2 - \varphi''(x)) \tag{8.2}$$

меняет свой знак на $[0, +\infty)$ конечное число раз и имеет место соотношение

$$hx\varphi'(x)\exp(-h\varphi(x)) \le C_\varphi, \tag{8.3}$$

то последовательность (8.1) равномерно квазивыпукла. Если же (8.2) не меняет знака на $[0, +\infty)$, то условие (8.3) является достаточным для ее равномерной квазивыпуклости.

В обоих для (8.1) случаях имеют место утверждения теорем 5.1, 6.1 и 7.1 (утверждения 1а) и 2а).

При выполнении на $[0, +\infty)$ дополнительного условия

$$\exp(-h\varphi(x))\ln(x+1) \le C_h\ ,\quad h > 0\ , \tag{8.4}$$

справедливы утверждения 1б) и 2б) теоремы 7.1 и 2а) и 2б) теоремы 7.2.

Для доказательства теоремы 8.1 достаточно проверить в первую очередь условие (2.5), тогда как (2.6) и (2.7), а также (6.1) очевидным образом выполнены.

Заметим, что если функция (8.2) меняет на $[0, +\infty)$ свой знак конечное число раз, то последовательность (8.1) кусочно-выпукла, а если знак сохраняет, то (8.1) выпукла или вогнута; сказанное вытекает из равенства

$$(\exp(-h\varphi(x))'' = h\exp(-h\varphi(x))(h(\varphi'(x))^2 - \varphi''(x)).$$

Далее, в работе [13] установлено, что если суммирующая последовательность (1.4) кусочно-выпукла, то достаточным условием для ее равномерной квазивыпуклости является требование

$$|\lambda_k(h)| + k\,|\Delta\lambda_k(h)| \le C_\lambda, \quad k = 0, 1, \ldots, \quad h > 0; \tag{8.5}$$

в частном же случае выпуклых (вогнутых) последовательностей ограничение (8.5) выполнено (см. [7, т. 1, с. 155–156].

Поскольку, $k\Delta\lambda_k(h)$ есть значение функции $x\exp(-h\varphi(x))(-h\varphi'(x))$, то условие (8.5) будет сведено к виду (8.3).

Наконец, условие (7.3) (там, где оно требуется) выполнено при ограничении (8.4).

Примерами экспоненциальных суммирующих последовательностей (8.1), удовлетворяющих условиям теоремы 8.1, служат [9]:

$$1)\ \lambda_k(h) = \exp(-h(\ln^\alpha k)), \quad k = 1,\ 2, \ldots, \quad \alpha > 0;$$

$$2)\ \lambda_k(h) = \exp(-h(k^\alpha)), \quad k = 1, 2, \ldots, \quad \alpha > 0.$$

В частности, при $\alpha = 1$ во втором примере узнаем классический метод суммирования Пуассона–Абеля (см. [7, т. 1, с. 160]).

9. Предельное поведение обобщенных дробных интегралов

В настоящем параграфе будем считать, что среднее значение функции $f(x)$ на отрезке $[-\pi, \pi]$ равно нулю, так что $c_0(f) = 0$. В этом случае определены операторы

$$\Upsilon_h: \quad f \mapsto \Upsilon_h[f, x] = \sum_{|k|>0} c_k(f)\frac{\exp(ikx)}{(ik)^h}. \tag{9.1}$$

Если $h = \vartheta$, где ϑ – натуральное число, то ряд (9.1) представляет собой формально проинтегрированный ϑ раз ряд Фурье (точнее, одну из возможных первообразных). При нецелых $h > 0$ говорят, что $\Upsilon_h[f, x]$ есть дробный интеграл ряда Фурье (см. [7, т. 1, с. 200–201]). Если устремить h к нулю, то естественно ожидать, что предел $\Upsilon_h[f, x]$ (например, при почти всех x) будет равен $f(x)$. Получение соответствующего результата и его обобщений и составляет задачу настоящего параграфа.

Ряд (9.1) можно также рассматривать как результат применения к (1.2) метода суммирования $\lambda = \{\lambda_k(h)\}$, определяемого последовательностью

$$\lambda_k(h) = \exp(-h\ln ik),$$

или, что то же самое,

$$\lambda_k(h) = \exp\left(-h(\ln|k| + i\frac{\pi}{2}\operatorname{sgn} k)\right), \ k = \pm 1, \pm 2, \ldots.$$

Как установлено в [7, т. 2, с. 201], интегральное ядро средних (9.1) линейным образом выражается через интегральные ядра (1.5) и (1.6), где в роли суммирующей последовательности (1.4) выступает последовательность $\{\exp(-h\ln k\}$, $k = 1,\ 2, \ldots$ Получим, прежде всего, аналогичный результат в более общем направлении, рассматривая

$$\lambda_k(h) = \exp\left(-h\left(\varphi(|k|) + i\frac{\pi}{2}\operatorname{sgn} k\right)\right),\ k = \pm 1,\ \pm 2, \ldots,\quad h > 0, \tag{9.2}$$

причем будем считать, что функция $\varphi(x)$ удовлетворяет условиям, сформулированным в начале параграфа 8.

Положим $\tau = \{\tau_k(h)\}$, где

$$\tau_k(h) = \exp(-h\varphi(|k|)),\quad k = \pm 1, \pm 2, \ldots,\quad h > 0. \tag{9.3}$$

Лемма 9.1. Пусть последовательность $\{\lambda_k(h)\}$ определена соотношением (9.2), среднее значение функции $f(x)$ на отрезке $[-\pi, \pi]$ равно нулю,

$$V_h(f) = V_h(f, x; \lambda) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \lambda_k(h) c_k(f) \exp(ikx) \tag{9.4}$$

и

$$\tilde{V}_h(f) = \tilde{V}_h(f, x; \lambda) = -i \sum_{k=-\infty}^{\infty} (\operatorname{sgn} k) \lambda_k(h) c_k(f) \exp(ikx).$$

Тогда имеют место представления:

$$V_h(f, x; \lambda) = U_h(f, x; \tau) \cos h\frac{\pi}{2} + \tilde{U}_h(f, x; \tau) \sin h\frac{\pi}{2} \tag{9.5}$$

и

$$\tilde{V}_h(f, x; \lambda) = \tilde{U}_h(f, x; \tau) \cos h\frac{\pi}{2} - U_h(f, x; \tau) \sin h\frac{\pi}{2}. \tag{9.6}$$

Доказательство. Докажем (9.5), доказательство (9.6) аналогично. Согласно (9.2), имеем (9.4) в виде

$$V_h(f, x; \lambda) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x-t) \exp i\left(kt - h\frac{\pi}{2}\operatorname{sgn} k\right) \exp(-h\varphi(k))\, dt =$$

$$= \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \exp(-h\varphi(k)) \int_{-\pi}^{\pi} f(x-t) \frac{\exp i\left(kt - h\frac{\pi}{2}\right) + \exp i\left(-kt + h\frac{\pi}{2}\right)}{2} dt =$$

$$= \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \exp(-h\varphi(k)) \int_{-\pi}^{\pi} f(x-t) \cos\left(kt - h\frac{\pi}{2}\right) dt =$$

$$= \frac{\cos h\frac{\pi}{2}}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \exp(-h\varphi(k)) \int_{-\pi}^{\pi} f(x-t) \cos kt\, dt +$$

$$+ \frac{\sin h\frac{\pi}{2}}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \exp(-h\varphi(k)) \int_{-\pi}^{\pi} f(x-t) \sin kt\, dt. \tag{9.7}$$

Добавляя к сумме в правой части (9.7) нулевое слагаемое

$$\frac{\cos h\frac{\pi}{2}}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(x-t)\,dt\,,$$

и пользуясь интегральной формой τ-средних (см. (9.3)) ряда Фурье функции f и τ-средних сопряженного ряда (см., напр., [9]), получаем, что соотношение (9.7) равносильно представлению (9.5), чем и завершается доказательство леммы 9.1.

Положим:

$$V_*(f) = V_*(f, x; \lambda) = \sup_{h>0} |V_*(f, x; \lambda)|$$

и

$$\tilde{V}_*(f) = \tilde{V}_*(f, x; \lambda) = \sup_{h>0} |\tilde{V}_*(f, x; \lambda)|,$$

где, по-прежнему, последовательность $\{\lambda_k(h)\}$ определена соотношением (9.2).

Теорема 9.1. Пусть функция (8.2) не меняет своего знака на $[0,+\infty)$ или меняет его конечное число раз и (в этом случае) выполнено условие (8.3). Пусть также (в обоих случаях) выполнено требование (8.4). Тогда:

1) если $\nu \in A_p$, $p > 1$, то имеют место оценки:

$$\| V_*(f) \|_{\nu,\, p} \le C_{\nu,\, p} \| f \|_{\nu,\, p}\,; \tag{9.8}$$

$$\| \tilde{V}_*(f) \|_{\nu,\, p} \le C_{\nu,\, p} \| f \|_{\nu,\, p}\,; \tag{9.9}$$

2) если $\nu \in A_p$, $p \ge 1$, то справедливы соотношения:

$$\mu\{x \in Q \,|\, V_*(f, x; \lambda) > \varsigma > 0\} \le C_{\nu,\, p} \left(\frac{\| f \|_{\nu,\, p}}{\varsigma} \right)^p; \tag{9.10}$$

$$\mu\{x \in Q \,|\, \tilde{V}_*(f, x; \lambda) > \varsigma > 0\} \le C_{\nu,\, p} \left(\frac{\| f \|_{\nu,\, p}}{\varsigma} \right)^p. \tag{9.11}$$

3) для всякой функции $f \in L_\nu^p(Q)$ и $\nu \in A_p$ равенства:

$$\lim_{h \to +0} V_h(f) = f \tag{9.12}$$

и

$$\lim_{h \to +0} \tilde{V}_h(f) = \tilde{f} \tag{9.13}$$

имеют место:

а) в метрике $L_\nu^p(Q)$ при $p > 1$;

б) μ-почти всюду при $p \ge 1$.

Доказательство. Из представлений (9.5) и (9.6) очевидным образом вытекают неравенства:

$$\| V_*(f) \|_{\nu,\, p} \le \| U_*(f) \|_{\nu,\, p} + \| \tilde{U}_*(f) \|_{\nu,\, p}$$

и

$$\| \tilde{V}_*(f) \|_{\nu,\, p} \le \| U_*(f) \|_{\nu,\, p} + \| \tilde{U}_*(f) \|_{\nu,\, p}.$$

Оценки (9.8) – (9.11) теперь следуют из утверждений теорем 7.1 1а) и 1б) и 7.2 – 1), если учесть равномерную квазивыпуклость (см. теорему 8.1) последовательности (9.3).

Далее, соотношения утверждения (9.12) и (9.13) о сходимости вытекают из утверждений теорем 7.1 (п. 2) и 7.2 (п. 2) , если снова воспользоваться теоремой 8.1.

Теорема 9.1. доказана.

Список литературы

1. Rozenblum, M. Summability of Fourier Series in $L^p(d\mu)$ / M. Rozenblum // Transactions of the American Mathematical Society. – 1962. – Vol. 105, No. 2. – P. 32 – 42.
2. Muckenhoupt, B. Weighted Norm Inequalities for the Hardy Maximal Function / B. Muckenhoupt // Transactions of the American Mathematical Society. – 1972. – Vol. 165. – P. 207 – 226.
3. Karamata, J. Sur la Sommation des Series de Fourier des Functions Continue / J. Karamata, M. Tomic // Publ. Inst. Math. Acad. Serbe scL. – 1955. – No. 8. – P. 123 – 138.
4. Karamata, J. Suite de Fonctionelles Lineaires et Facteurs de Convergence des Series de Fourier / J. Karamata // Journal de Mathématiques Pures et Appliquées. – 1956. – Vol. 35, No. 1. – P. 87 – 95.
5. Баусов, Л. И. О линейных методах суммирования рядов Фурье / Л. И. Баусов // Мат. сб. – 1965. – Т. 68 (110), № 3. – С. 313 – 327.
6. Эдвардс, Р. Ряды Фурье в современном изложении. В 2-х томах / Р. Эдвардс ; пер. с англ. В. А. Скворцова. – М. : Мир, 1985. – Т. 1. – 260 с.
7. Зигмунд, А. Тригонометрические ряды : в 2-х томах / А. Зигмунд ; пер. с англ. – М. : Мир, 1965. – Т. 1. – 615 с. ; Т. 2. – 537 с.
8. Нахман, А. Д. Ограниченность семейств операторов свертки в пространствах L^p / А. Д. Нахман // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2021. – Т. 27, № 3. – С. 449 – 460. doi: 10.17277/vestnik.2021.03.pp.449-460
9. Нахман, А. Д. Экспоненциальные методы суммирования рядов Фурье / А. Д. Нахман, Б. П.Осиленкер // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2014. – Т. 20, № 1. – С. 101 – 109.
10. Hunt, R. A. Weighted Norm Inequalities for Conjugate Function and Hilbert Transform / R. A. Hunt, B. Muckenhoupt, R. Wheeden // Transactions of the American Mathematical Society. – 1973. – Vol. 176. – P. 227 – 251.
11. Nakhman, A. D. Regular Semi-Continuous Methods of Summation of Fourier Series / A. D. Nakhman, B. P. Osilenker // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 1. – С. 135 – 148. doi: 10.17277/vestnik.2017.01.pp.135-148
12. Hunt, R. A. Weighted Norm Inequality for Fourier Series / R. A. Hunt, Wo-Sang Young // Bulletin of the American Mathematical Society. – 1974. – Vol. 80, No. 2. – P. 274 – 277.
13. Осиленкер, Б. П. Задачи, ассоциированные с представлением Дирихле полугруппы операторов / Б. П. Осиленкер, А. Д. Нахман // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2018. – Т. 24, № 3. – С. 492 – 511. doi: 10.17277/vestnik.2018.03.pp.492-511

Two Classes of Convolution Operators in Weighted Lebesgue Spaces

B. P. Osilenker, A. D. Nakhman

Department of Higher Mathematics, alextmb@mail.ru; TSTU, Tambov, Russia

Keywords: approximate units; maximum marks; convolution operators; means of Fourier series and conjugate series.

Abstract: Two classes of convolution operators generated by functions from weighted Lebesgue spaces are considered. In terms of conditions on the Fourier coefficients of families of integral kernels, the maximum estimates for the weight L^p-norms of convolution operators of strong ($p>1$) and weak ($p\geq 1$) types are established. Convergence theorems are proposed; approximative units are constructed in the corresponding *-algebra. The results obtained are extended to families of linear mean Fourier series and conjugate series. In particular, exponential summation methods and their applications to generalized fractional integrals are considered.

References

1. Rozenblum M. Summability of Fourier Series in $L^p(d\mu)$, *Transactions of the American Mathematical Society*, 1962, vol. 105, no. 2, pp. 32-42.

2. Muckenhoupt B. Weighted Norm Inequalities for the Hardy Maximal Function, *Transactions of the American Mathematical Society*, 1972, vol. 165, pp. 207-226.

3. Karamata J., Tomic M. Sur la Sommation des Series de Fourier des Functions Continue, *Publ. Inst. Math. Acad. Serbe scL.*, 1955, no. 8, pp. 123-138.

4. Karamata J. Suite de Fonctionelles Lineaires et Facteurs de Convergence des Series de Fourier, *Journal de Mathématiques Pures et Appliquées*, 1956, vol. 35, no. 1, pp. 87-95.

5. Bausov L.I. [On linear methods of summation of Fourier series], *Matematicheskiy sbornik* [Mathematical collection], 1965, vol. 68 (110), no. 3, pp. 313-327. (In Russ.)

6. Edvards R. *Ryady Fur'ye v sovremennom izlozhenii. V 2-kh tomakh* [Fourier series in modern presentation. In 2 volumes], Moscow: Mir, 1985, vol. 1, 260 p. (In Russ.)

7. Zygmund A. *Trigonometric series*, Cambridge University Press, 1959.

8. Nakhman A.D. [Boundedness of families of convolution operators in spaces], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2021, vol. 27, no. 3, pp. 449-460, doi: 10.17277/vestnik.2021.03.pp.449-460 (In Russ., abstract in Eng.)

9. Nakhman A.D., Osilenker B.P. [Exponential summation methods for Fourier series], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2014, vol. 20, no. 1, pp. 101-109. (In Russ., abstract in Eng.)

10. Hunt R.A., Muckenhoupt B., Wheeden R. Weighted Norm Inequalities for Conjugate Function and Hilbert Transform, *Transactions of the American Mathematical Society*, 1973, vol. 176, pp. 227-251.

11. Nakhman A.D., Osilenker B.P. Regular Semi-Continuous Methods of Summation of Fourier Series, *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 1, pp. 135-148, doi: 10.17277/vestnik.2017.01.pp.135-148 (In Eng., abstract in Russ.)

12. Hunt R.A., Young Wo-Sang Weighted Norm Inequality for Fourier Series, *Bulletin of the American Mathematical Society*, 1974, vol. 80, no. 2, pp. 274-277.

13. Osilenker B.P., Nakhman A.D. [Problems associated with the Dirichlet representation of a semigroup of operators], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2018, vol. 24, no. 3, pp. 492-511, doi: 10.17277/vestnik.2018.03.pp.492-511 (In Russ., abstract in Eng.)

Zwei Klassen von Faltungsoperatoren in gewichteten Lebesgue-Räumen

Zusammenfassung: Es sind zwei Klassen von Faltungsoperatoren betrachtet, die durch Funktionen aus gewichteten Lebesgue-Räumen erzeugt sind. In Bezug auf die Bedingungen für die Fourier-Koeffizienten von Integralkernfamilien sind die maximalen Schätzungen für die L^p-Gewichtungsnormen von Faltungsoperatoren vom starken ($p > 1$) und schwachen ($p \geq 1$) Typ festgelegt. Konvergenztheoreme sind vorgeschlagen; approximative Einheiten sind in der entsprechenden *-Algebra konstruiert. Die erhaltenen Ergebnisse sind auf Familien von linearen gemittelten Fourier-Reihen und konjugierten Reihen erweitert. Insbesondere sind exponentielle Summationsmethoden und ihre Anwendung auf verallgemeinerte Bruchintegrale untersucht.

Deux classes d'opérateurs de convolution dans les espaces de poids lebesgue

Résumé: Sont examinées deux classes d'opérateurs de convolution générés par des fonctions à partir des espaces de poids de lebesgue. En termes de conditions sur les coefficients de Fourier des familles de noyaux intégraux, sont établies les estimations maximales des poids-normes L^p des opérateurs de convolution de type fort ($p > 1$) et faible ($p \geq 1$). Sont proposées des théorèmes de convergence des unités approximatives; sont construites les unites approximatives dans l'algèbre* correspondante. Les résultats obtenus sont transférés aux familles de séries moyennes linéaires de Fourier et de séries conjuguées. En particulier, sont examinées les méthodes exponentielles de sommation et leur application à l'intégrale fractionnaire généralisée.

Авторы: ***Осиленкер Борис Петрович*** – доктор физико-математических наук, профессор; ***Нахман Александр Давидович*** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Высшая математика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

УДК 66.022.54
DOI: 10.17277/vestnik.2022.04.pp.662-673

АГРЕГАТЫ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ СМЕСИ ИЗ КОМПОНЕНТОВ, СКЛОННЫХ К СЕГРЕГАЦИИ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ. ЧАСТЬ I

В. Мансур, В. Ф. Першин

Кафедра «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», pershin.home@mail.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия

Ключевые слова: весовое дозирование; двухстадийное дозирование; качество смеси; технология «нонмиксинг»; технология Loss-in-Weight; точность дозирования; упорядоченная загрузка компонентов.

Аннотация: Рассмотрены основные способы дозирования и смешивания, а также устройства для их реализации. Показано, что основной причиной, препятствующей повышению точности дозирования, являются динамические воздействия на датчик веса, поскольку вес материала определяется во время его движения. Проведен анализ двухстадийной технологии весового непрерывного дозирования. Отмечено, что с точки зрения повышения точности дозирования, данная технология является наиболее перспективной. Намечены пути совершенствования двухстадийной технологии дозирования и устройств для ее реализации. Показана необходимость рассматривать процессы дозирования компонентов и их смешивание совместно с учетом их взаимосвязи.

Введение

Дисперсные системы состоят из твердых частиц, капель или пузырьков газа (дисперсная фаза), распределенных в какой-либо среде (дисперсионной). Основные виды дисперсных систем: аэрозоли, суспензии, эмульсии, золи, гели, порошки, волокнистые и т.д. Таким образом, сыпучие материалы или порошки являются дисперсными системами. В дальнейшем будем использовать термин сыпучие материалы, поскольку данный термин наиболее четко определяет отличие данных материалов от связных дисперсных систем. Связные дисперсные системы возникают при контакте частиц дисперсной фазы, приводящем к образованию структуры в виде каркаса или сетки. Такая структура ограничивает текучесть дисперсной системы и придает ей способность сохранять форму. В технике под сыпучим материалом подразумевают дисперсную систему, состоящую из твердых частиц произвольной формы, находящихся в контакте. Пространство между частицами в сыпучем материале заполнено газом, а иногда частично жидкостью [1]. Под процессом смешивания (или смешения) принято понимать такой механический процесс, в результате которого первоначально находящиеся раздельно ком-

поненты после их равномерного распределения в смешанном объеме образуют однородную смесь. Обратным ему является процесс сегрегации, приводящей к разделению смеси на отдельные компоненты. Разработано много способов и устройств для приготовления смесей. В работе [1] предложена следующая классификация смесителей:

– по характеру протекания процесса во времени (смесители периодического и непрерывного действия);

– природе силового воздействия на частицы (смесители гравитационные, центробежные, пневматические, электромагнитные и т.д.);

– механизму смешивания частиц: циркуляционные; объемного или диффузионного смешивания; прямоточные;

– конструктивным особенностям: барабанные; шнековые; ленточные; лопастные и т.д.;

– по способу управления: с ручным автоматическим или программным управлением.

Процесс приготовления смесей реализуется в агрегатах, состоящих из дозаторов компонентов и смесителя. Агрегат (от лат. *aggregatu*s – соединенный, собранный) – сложная машина, включающая несколько машин, соединенных в одно целое.

К наиболее значимым физико-механическим параметрам сыпучих материалов относятся следующие: гранулометрический состав; влажность; гигроскопичность; насыпная плотность; температуры плавления и воспламенения; коррозионная стойкость и ряд других, характеризующих механические свойства [1]. На характер движения сыпучих материалов, наибольшее влияние оказывают коэффициенты внешнего трения покоя и движения; внутреннего трения покоя и движения. Способы и приборы для определения указанных выше характеристик сыпучих материалов, а также методики и приборы для определения коэффициентов достаточно подробно представлены в работе [2].

Описание способов дозирования и конструкции дозаторов дано в работах [2, 3]. В результате анализа научно-технической литературы и результатов экспериментальных исследований установлено, что основной причиной, снижающей точность непрерывного весового дозирования, являются динамические воздействия на датчик веса [4, 5]. В данной работе рассмотрены варианты дальнейшего совершенствования двухстадийной технологии дозирования [6 – 8], поскольку, используя данную технологию, возможно полностью исключить динамические воздействия на датчик веса и повысить точность дозирования.

Способы приготовления смесей сыпучих материалов и конструкции смесителей для реализации этих способов рассмотрены в работах [9, 10]. Анализ показывает, что далеко не все способы и устройства могут быть адаптированы для приготовления смесей из компонентов, склонных к сегрегации. Кроме этого, практически нет исследований, в которых учитывается точность дозирование на качество готовой смеси, поэтому необходимо более подробно проанализировать две основные составляющие агрегата для приготовления смесей из компонентов склонных к сегрегации, а именно, дозаторы и смесители, а также рассмотреть основные причины и закономерности процесса сегрегации.

Непрерывное дозирование сыпучих материалов

Основная цель непрерывного весового дозирования заключается в обеспечение фиксированного (заданного) количества вещества, переносимого потоком в единицу времени. Основными характеристиками дозаторов являются производительность и погрешность дозирования, то есть отклонение производительности от заданных значений за определенный промежуток времени.

В современных технологиях получения новых конструкционных и функциональных материалов широко используются наноматериалы для улучшения эксплуатационных характеристик. Массовая доля наноматериалов обычно составляет не более десятых долей процента от общей массы. Практический опыт производства и использования наноматериалов показал, что пределы допускаемой погрешности дозаторов, рассчитанные по пробам, которые отбираются из непрерывного потока в течение 6 минут, что соответствует ГОСТам, не обеспечивают требуемые показатели качества готового продукта [11]. В связи с данным обстоятельством необходимо повысить точность непрерывного весового дозирования порошкообразных материалов, особенно за промежутки времени не более 1 минуты. Для того чтобы решить эту задачу, необходимо проанализировать причины погрешностей непрерывного дозирования и предложить пути их устранения.

В настоящее время фирмы, производящие дозаторы, используют два основных способа непрерывного весового дозирования [12, 13]. В первом производительность дозирования определяется и управляется в результате взвешивания сыпучего материала (порошка), который находится в движении, на ленте транспортера (рис. 1) [12]. Весы с дозирующей лентой состоят из ленточного конвейера *1* с приводом постоянного тока *2* и цифровым тахометром *3*. Датчик веса *4* установлен под лентой транспортера. Иногда используют ленточный контейнер, один край которого шарнирно соединен с основанием, а второй установлен на весовую платформу или датчик веса. Сигнал от датчика *4* подается на контроллер *5*, где вычисляется реальная производительность дозатора и сравнивается с заданным значением. Управляющий сигнал с контролера подается на привод *2*, который изменяет скорость движения ленты, следовательно, и производительность дозатора.

Во втором способе [13] взвешивают материал, который находится в бункере, и производительность дозатора определяют как разницу двух последующих измерений веса бункера с материалом (рис. 2), которые выполняют через фиксированные промежутки времени. Данный способ называют Loss-in-Weight (убывание в весе).

Устройство состоит из малого бункера *1*, в нижней части которого расположен шнек *2* с приводом вращения *3*. Бункер установлен на весоизмерительную платформу с датчиками *4*. Сигнал, подающийся с весоизмерительного датчика на контроллер *5*, усиливается, масштабируется и сравнивается с заданным значением, зависящим от требуемой производительности дозатора. Над малым бункером *1* установлен большой бункер *6* с шибером *7*. Система работает следующим образом. Из большого бункера *6* в малый бункер *1* подается порция сыпучего

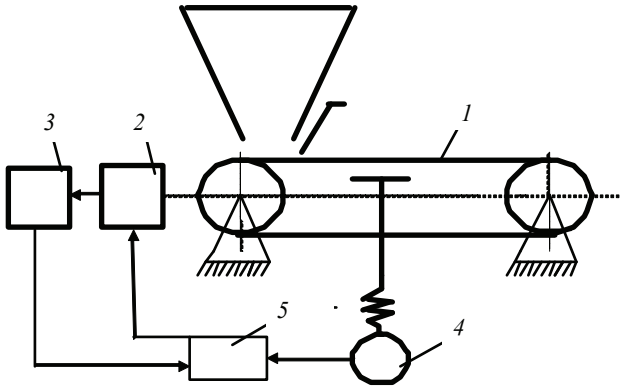


Рис. 1. Схема весового ленточного дозатора

материала, после чего шибер *7* закрывается. С весоизмерительного датчика *4* подается сигнал на контроллер *5*, где фиксируется начальный вес материала в бункере *1*. Включается привод *3* , и шнеком *2* материал непрерывно выгружается из бункера *1*. Через определенное время Δt с весоизмерительного датчика *4* подается сигнал на контроллер *5*. Контроллер рассчитывает вес материала в бункере *1*, который должен быть через отрезок времени Δt при заданной производительности, и сравнивает данное значение с показаниями датчика *4*. Если вес материала в бункере *1* больше, чем расчетное значение, то контроллер *5* подает управляющий сигнал на привод *3* и увеличивает скорость вращения шнека; если меньше – скорость уменьшается. Когда вес материала в бункере *1* достигает минимального значения (примерно 0,1 от первоначального), контролер *5* подает управляющий сигнал на шибер *7* и осуществляется загрузка очередной порции материала из бункера *6* в бункер *1*. После этой операции цикл дозирования повторяется. В период загрузки очередной порции шнек *2* вращается с постоянной угловой скоростью.

Для производительности Q в любой момент времени, за фиксированный интервал времени Δt, должно выполняться условие

$$Q = P/\Delta t, \tag{1}$$

где P – вес материала, вышедшего из дозатора за интервал времени Δt, в течение которого отбирают отдельные порции зернистого материала, для экспериментального определения весовой производительности дозатора и его точности. Численное значение Δt зависит от методики расчета точности непрерывного дозирования.

В промышленности используются многочисленные конструкции для реализации данных способов дозирования. Несмотря на существенную разницу между указанными способами, их объединяет общая причина возникновения погрешности дозирования – динамические воздействия на весовой датчик, поскольку взвешивание материала осуществляется во время его движения. Следует обратить особое внимание на то, что блок управления фиксирует уже допущенную погрешность в производительности дозатора и только потом пытается компенсировать эту ошибку.

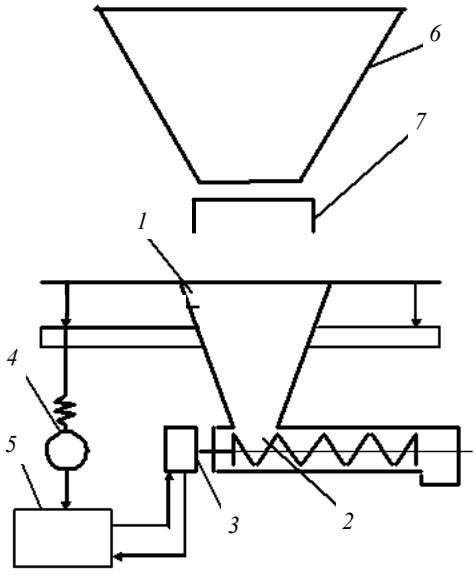


Рис. 2. Схема весового дозатора Loss-in-Weight

В работе [13] даны результаты по определению свойств биомассы, влияющих на точность и производительность дозатора. Рассмотрены принципы проектирования и выбора дозаторов. В работе [14] частицы биомассы (75…1000 мкм) подавали со скоростью 9,0…66,5 мг/мин с помощью устройства подачи частиц. Частицы самотеком подавались через инжекционную трубку, скорость подачи регулировалась изменением скорости толкателя. Частицы подавали на весы, а показания массы непрерывно регистрировались блоком управления. Исследованы факторы, влияющие на воспроизводимость и стабильность скорости подачи, то есть точность дозирования.

Стабильная непрерывная микроподача мелкодисперсных когезионных порошков в последнее время приобрела важность во многих областях [15]. Тем не менее на практике проблема осталась из-за скопления порошка, вызванного межчастичным взаимодействием. В данной статье представлен новый способ подачи мелкодисперсного когезионного порошка, приводимого в действие импульсной силой инерции и силой акустического излучения одновременно в ультразвуковом поле стоячей волны. Форсунки с разным диаметром выходного отверстия изготавливали из стекла. Движение порошка через отверстие форсунки в стержневом режиме осуществлялось за счет импульсной силы инерции. Сила акустического излучения разрушала стержень на большое количество мелких агломератов, которые случайным образом ударялись друг о друга. Таким образом, устранялась агрегация порошков. Минимальные значения производительности составляли 0,4 мг/с, что значительно меньше, чем у существующих вибрационных питателей с малыми капиллярами. Информация о точности дозирования отсутствовала.

В работе [16] предложены прогностические модели на основе данных о свойствах материалов фармацевтической промышленности. Модели адаптированы для весовых дозаторов Loss-in-Weight и порошков – безводной лактозы; стеарата магния; кроскармеллозы натрия; микрокристаллической целлюлозы. Показано, что, используя только данные о конфигурации питателя, эти модели для конкретных материалов могут точно прогнозировать производительность. Недостаток их заключается в том, что для каждого конкретного материала должен быть разработан свой вариант модели.

Метод оценки стационарных характеристик подачи порошка с потерей веса (Loss-in-Weight) предложен в работе [17]. На рисунке 3 продемонстрировано применение данного метода на примере дозатора Tron KT35 при дозировании трех фармацевтических порошков: Fast Flo Lactose, Avicel PH-102, Ceolus KG-802 средний размер частиц и насыпная плотность которых равны соответственно 100 мкм и 0,58 г/см^3; 100 мкм и 0,30 г/см^3; 50 мкм и 0,21 г/см^3. Дозатор состоит из трех частей: собственно дозатора (LIW Feeder); весовой платформы (Load cell); гравиметрического контроллера (Controller). Объемный дозатор установлен на платформе для взвешивания, которая измеряет массу питателя и его бункера для порошка. Весовая платформа периодически передает информацию о весе дозатора и находящегося в нем порошка в гравиметрический контроллер. Используя разницу по весу, измеренному платформой, деленную на промежуток времени между соседними взвешиваниями, контроллер определяет мгновенную производительность, которую сравнивают с заданным значением.

Выявлены и детально изучены три режима отклонений от заданной производительности для дозаторов, реализующих технологию Loss-in-Weight [18]. Во-первых, исследована чрезмерная изменчивость массового расхода относительно заданного значения, затем – неточное дозирование (например, постоянная избыточная или недостаточная производительность) относительно заданного значения.

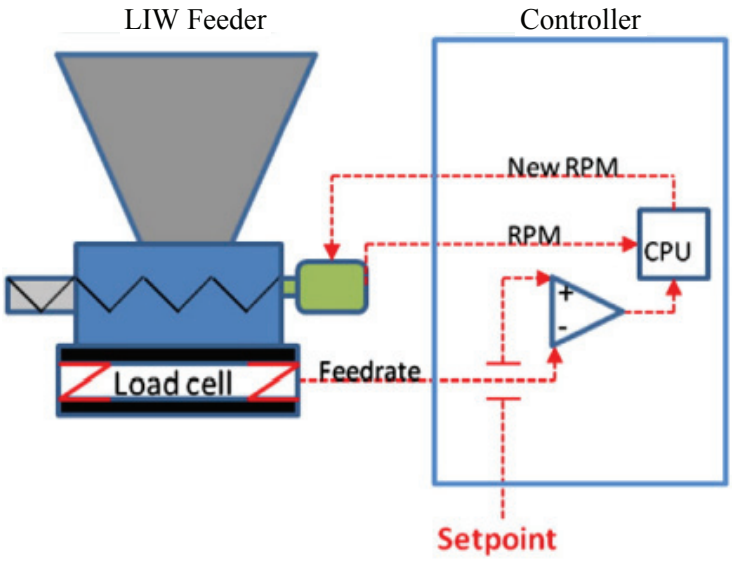


Рис. 3. Схема дозатора Tron KT35

Далее изучены переходные возмущения, которые часто возникают из-за наполнения бункера, внешних воздействий на весы и/или изменений свойств материала и потока. Проведены эксперименты по непрерывному процессу прямого сжатия с использованием двух режимов управления питателями: локального (управление отдельным питателем) и режима соотношения (управление системой в дополнение к управлению отдельным питателем). Доказано, что режим соотношения более эффективен, чем локальный, для подачи смеси в последующий процесс. Использование контроля соотношения в подаче лекарственных и вспомогательных веществ уменьшило неоднородность с 5,1 до 2,1 %. Показано, что режим управления соотношением как точность, так и прецизионность во время возмущений.

Система измерения массового расхода на основе изображений представлена в работе [19]. Масса, массовый расход и размеры частиц успешно контролировались в режиме реального времени с помощью разработанной видеометрической системы, состоящей из высокоскоростной технологической камеры, сопряженной с программным обеспечением для анализа. Система протестирована в режиме управления с обратной связью для автоматического достижения желаемой производительности, за счет регулирования скорости подачи материала, измеренного системой анализа изображений. Разработанная видеометрическая система может служить универсальным инструментом и обеспечить ценной информацией о процессе в режиме реального времени, которая необходима для современного непрерывного производства фармацевтической продукции.

Более конкретная информация о весовых дозаторах непрерывного действия имеется на интернет-сайтах ведущих мировых фирм, выпускающих их [12, 13].

Выше отмечалось, что основным препятствием повышения точности весового непрерывного дозирования являются динамические нагрузки на датчик веса, поскольку вес материала определяют, когда он находится в движении. В целях уменьшения динамических воздействий на весовой датчик разработана двухстадийная технология непрерывного весового дозирования. Данная технология заключается в следующем [4]. На первой стадии формируются отдельные порции

материала с определенным весом ΔP, которые через равные промежутки времени ΔT подаются в специальное устройство; на второй – устройство преобразует отдельные порции материала в непрерывный поток. Производительность дозатора определяется по формуле

$$Q = \Delta P/\Delta T. \quad (2)$$

Для формирования отдельных порций можно использовать практически любой весовой порционный дозатор, который выпускается серийно. Анализ характеристик порционных дозаторов и дозаторов непрерывного действия, которые выпускают ведущие мировые фирмы, показал, что всегда точность порционных дозаторов выше. Это можно объяснить тем, что в данных дозаторах динамические нагрузки на весоизмерительную систему намного меньше, чем в дозаторах непрерывного действия. Разработан ряд усовершенствованных способов двухстадийного дозирования и устройств для их реализации [6 – 8].

На настоящий момент самая высокая точность непрерывного весового дозирования достигнута при использовании способа непрерывного весового дозирования сыпучего материала и устройства для его осуществления [8]. Схема дозатора показана на рис. 4. Устройство состоит из основания *1*; подвижной платформы *2*; шарнира *3*; лотка *4*; передней *5* и задней *6* опор; вибратора *7*; бункера *8*; основного шнека *9*; дополнительного шнека *10*; приводов вращения основного *11* и дополнительного *12* шнеков; весовой платформы *13*; блока управления *14*; узлов загрузки *15* и выгрузки *16*. Устройство работает следующим образом. В блок управления вводятся данные: заданная производительность дозатора Q, г·с$^{-1}$; вес отдельной порции материала ΔP, г. В блоке управления рассчитывается промежуток времени ΔT, с. Блок управления фиксирует вес бункеров с материалом, приводов и шнеков и подает команду на включение привода *11* вращения основного шнека. Блок управления, определив вес материала в бункерах, обработав сигнал, поступающий с весоизмерительного устройства *13*, вычисляет вес материала, поступившего из основного бункера в лоток *4*, как разницу между исходным весом и его текущим значением, между подачей отдельных порций в лоток *4*. Когда вес материала, поступившего в лоток *4*, достигает значения разности $\Delta P - \delta P_{осн}$, блок управления выключает привод *11* и привод *12* дополнительного шнека *10*. Отклонение веса порции от среднего значения $\delta P_{осн}$ определяется экспериментально для конкретного сыпучего материала, производительности основного питателя $Q_{осн}$ и веса отдельной порции ΔP. Если $\delta P_{осн}$ не определено, то его принимают равным $0{,}1\Delta P$. В качестве дозируемых материалов использовали углеродные волокна и трубки:

– «Таунит» – углеродные нановолокна с конической ориентацией слоев (внешний диаметр 30…60 нм, насыпная плотность 0,4…0,6 г/см^3);

– «Таунит-М» – коаксиальные углеродные нанотрубки (диаметр 8…15 нм, насыпная плотность 0,03…0,05 г/см^3);

– «Таунит-МД» – длинные коаксиальные углеродные нанотрубки (диаметр 30…60 нм, насыпная плотность 0,03…0,05 г/см^3).

Кроме этого, применяли катализаторы для производства углеродных нанотрубок:

– NiMg (размер частиц 80…140 мкм, насыпная плотность 0,356 г/см^3);

– CoMoMgAl (размер частиц 50…80 мкм, насыпная плотность 0,062 г/см^3);

– CoMoMgAlFe (размер частиц 50…140 мкм, насыпная плотность 0,048 г/см^3).

Погрешности дозирования экспериментально определяли при производительности дозатора 0,1…1 г/с. Точность определения веса отдельной порции (точность весовой платформы) составляла 0,001 г. В качестве блока управления

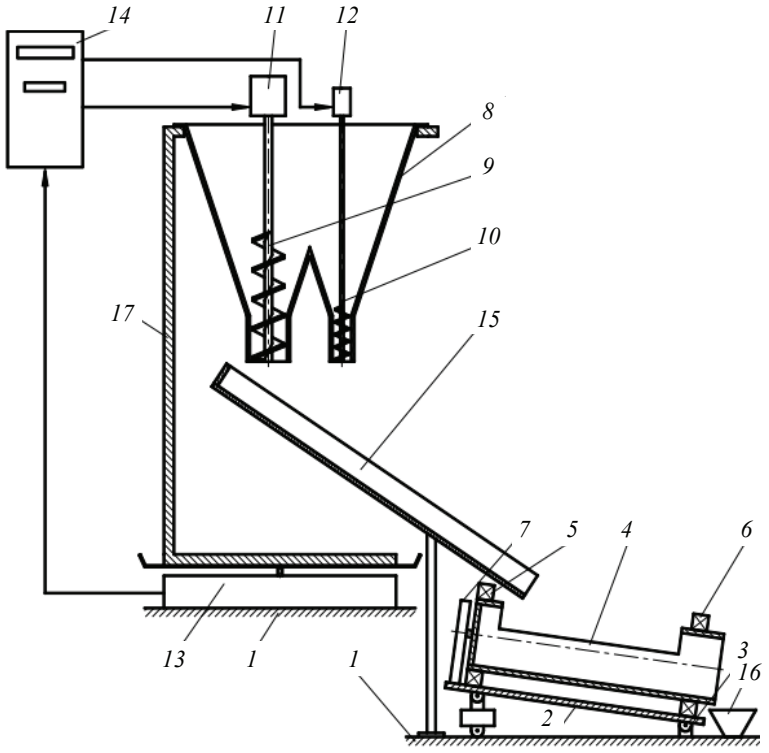


Рис. 4. Схема устройства для двухстадийного непрерывного весового дозирования

использовали персональный компьютер. В процессе экспериментов фиксировали вес каждой порции. В блок управления вводились значения заданной производительности дозатора Q, г·с$^{-1}$, и ориентировочное значение ΔP. Это значение рассчитывалось из условия ΔT = 30 или ΔT = 60 с, чтобы максимально корректно сравнить погрешности, которые возникали при использовании прототипа и предлагаемого способа дозирования. Из непрерывного потока сыпучего материала отбирали пробы, которые затем взвешивали и проводили статистическую обработку результатов по общепринятым методикам. В результате анализа экспериментальных данных установлено, что при заданной производительности дозирования q = 0,05 г/с погрешность непрерывного дозирования составила 0,6 %, а при производительности q = 0,5 г/с – 0,25 %.

Результаты предварительных экспериментальных исследований показали, что при использовании двухстадийной технологии дозирования можно полностью исключить динамические воздействия на датчик веса. Принципиальное отличие нового способа дозирования заключается в том, что окончательное формирование порции осуществляется объемным способом, взвешивание порции порошка проводится после окончательного формирования порции, то есть когда материал находится в состоянии покоя. Обеспечение заданной весовой производительности дозатора происходит за счет того, что отрезок времени ΔT между подачей соседних порций рассчитывается из условия

$$\Delta T = \Delta P/Q. \quad (3)$$

Ранее отмечалось, что при реализации весового дозирования, во всех используемых в настоящее время способах, блок управления фиксирует отклонение производительности дозатора от заданного значения и только после этого дает ко-

манду на исправления этой ошибки. При данной последовательности операций (формирование порции материала, определение веса порции ΔP, расчет отрезка времени ΔT) отклонений производительности дозатора от заданного значения нет, поскольку значение ΔT на каждом цикле определяется по формуле (3), что гарантирует обеспечение условия (2).

Список литературы

1. Процессы и аппараты химической технологии. Т. 2. Механические и гидромеханические процессы / Д. А. Баранов, В. Н. Блиничев, А. В. Вязьмин [и др.] ; под ред. А. М. Кутепова. – М. : Логос, 2001. – 600 с.

2. Каталымов, А. В. Дозирование сыпучих и вязких материалов / А. В. Каталымов, В. А. Любартович. – Л. : Химия, 1990. – 240 с.

3. Весовое дозирование зернистых материалов / С. В. Першина, А. В. Каталымов, В. Г. Однолько, В. Ф. Першин. – М. : Машиностроение, 2009. – 260 с.

4. Пат. 2138783 Российская Федерация, МПК G01F 11/00. Способ непрерывного дозирования сыпучих материалов / В. Ф. Першин, С. В. Барышникова ; заявитель и патентообладатель Тамбовский государственный технический университет. – № 98110906/28 ; заявл. 02.06.98 ; опубл. 27.09.99, Бюл. № 27.

5. Двухстадийное непрерывное дозирование при производстве и использовании углеродных наноматериалов / В. Ф. Першин, А. М. Воробьев, В. М. Нечаев [и др.] // Хим. и нефтегазовое машиностроение. – 2018. – № 6. – С. 12 – 14.

6. Пат. 2251083 Российская Федерация, МПК J01B 11/00. Способ непрерывного дозирования сыпучих материалов и устройство для его осуществления / В. Ф. Першин, С. В. Барышникова, Д. К. Каляпин, А. А. Осипов ; заявитель и патентообладатель Тамбовский государственный технический университет. – № 2003109774/28 ; заявл. 07.04.2003 ; опубл. 27.04.2005, Бюл. № 12. – 10 с.

7. Полезная модель к пат. 113353 Российская Федерация, МПК G01 F11/00. Устройство для непрерывного двухстадийного дозирования углеродных материалов / С. В. Першина, А. И. Ди Джиннаро, В. Г. Однолько, А. А. Осипов, В. Ф. Першин, П. М. Явник ; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет». – № 2011126102/28 ; заявл. 24.06.2011 ; опубл. 10.02.2012, Бюл. № 4.

8. Пат. 2691786 Российская Федерация, МПК G01F 11/00. Способ непрерывного весового дозирования сыпучего материала и устройство для его осуществления / В. Ф. Першин, Т. Х. К. Алсайяд, А. Г. Ткачев, А. А. Баранов, А. А. Осипов ; заявитель и патентообладатель Тамбовский государственный технический университет. – № 2018128803 ; заявл. 31.10.2018 ; опубл. 18.06.2019, Бюл. № 17. – 12 с.

9. Макаров, Ю. И. Аппараты для смешения сыпучих материалов / Ю. И. Макаров. – М. : Машиностроение, 1973. – 216 с.

10. Конструирование и расчет машин химических производств / Ю. И. Гусев, И. Н. Карасев, Э. Э. Кольман–Иванов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1985. – 408 с.

11. Improving the Accuracy of Two-Stage Weight Feeding Technology of Bulk Solids / T. Alsayyad, V. Pershin, A. Pasko, T. Pasko // AIP Conference Proceedings. – 2017. – Vol. 1899, No. 1. – P. 060011. doi: 10.1063/1.5009882

12. Low Capacity Weighbelt Feeder. – Текст : электронный // Ramsey. – URL : http://www.thermo-ramsey.com (дата обращения: 21.05.2022).

13. Coperion K-Tron Feeders. – Текст : электронный // Coperion. – URL : https://www.coperion.com/en/products-services/process-equipment/feeders (дата обращения: 21.05.2022).

14. Dai, J. Biomass Feeding for Thermochemical Reactors / J. Dai, H. Cui, J. R. Grace // Progress in Energy and Combustion Science. – 2012. – Vol. 38, No. 5. – P. 716 – 736. doi: 10.1016/j.pecs.2012.04.002

15. Molinder, R. Feeding Small Biomass Particles at Low Rates / R. Molinder, H. Wiinikka // Powder Technology. – 2015. – Vol. 269. – P. 240 – 246. doi: 10.1016/j.powtec.2014.09.010

16. Development of Feed Factor Prediction Models for Loss-in-Weight Powder Feeders / F. Tahira, J. Palmerb, J. Khooc [et al.] // Powder Technology. – 2019. – Vol. 364. – P. 1025 – 1038. doi: https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.09.071

17. Engisch, W. E. Method for Characterization of Loss-in-Weight Feeder Equipment / W. E. Engisch, F. J. Muzzio // Powder Technology. – 2012. – Vol. 228. – P. 395 – 403. doi: 10.1016/j.powtec.2012.05.058

18. Hanson, J. Control of a System of Loss-in-Weight Feeders for Drug Product Continuous Manufacturing / J. Hanson // Powder Technology. – 2018. – Vol. 331. – P. 236 – 243. doi: 10.1016/j.powtec.2018.03.027

19. Videometric Mass Flow Control: A New Method for Real-Time Measurement and Feedback Control of Powder Micro-Feeding Based on Image Analysis / L. Madarásza, Á. Köte, M. Gyürkésa [et al.] // International Journal of Pharmaceutics. – 2020. – Vol. 580. – P. 119223. doi: 10.1016/j.ijpharm.2020.119223.

20. Производство графеносодержащих суспензий и концентратов каскадной эксфолиацией графита / Р. А. Аль-Джарах, А. М. Аль-Машхадани, В. Мансур [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2022. – Т. 28, № 1. – С. 139 – 152. doi: 10.17277/vestnik.2022.01.pp.139-152

Apparatus for Preparing a Mixture from Components Prone to Segregation: Current Status and Prospects. Part I

V. Mansur, V. F. Pershin

Department of Technological Processes, Devices and Technosphere Safety, pershin.home@mail.ru; TSTU, Tambov, Russia

Keywords: weight dosing; two-stage dosing; mixture quality; non-mixing technology; Loss-In-Weight technology; dosing accuracy; ordered loading of components.

Abstract: The main methods of dosing and mixing, as well as installations for implementing these methods are considered. It is shown that the main reason that hinders the increase in dosing accuracy is the dynamic effects on the weight sensor, since the weight of the material is determined during its movement. The analysis of the two-stage technology of weight continuous dosing was carried out. It is noted that from the point of view of increasing the dosing accuracy, this technology is the most promising. The ways of improving the two-stage dosing technology and apparatus for its implementation are outlined. The need to consider the processes of dosing components and their mixing together, taking into account their relationship, is shown.

References

1. Baranov D.A., Blinichev V.N., Vyaz'min A.V. [et al.], Kutepov A. M. [Ed.] *Protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii. T. 2. Mekhanicheskiye i gidromekhanicheskiye protsessy* [Processes and devices of chemical technology. Vol. 2. Mechanical and hydromechanical processes], Moscow: Logos, 2001, 600 p. (In Russ.)

2. Katalymov A.V., Lyubartovich V.A. *Dozirovaniye sypuchikh i vyazkikh materialov* [Dosing of bulk and viscous materials], Leningrad: Khimiya, 1990, 240 p. (In Russ.)

3. Pershina S.V., Katalymov A.V., Odnol'ko V.G., Pershin V.F. *Vesovoye dozirovaniye zernistykh materialov* [Weight dosing of granular materials], Moscow: Mashinostroyeniye, 2009, 260 p. (In Russ.)

4. Pershin V.F., Baryshnikova S.V. *Sposob nepreryvnogo dozirovaniya sypuchikh materialov* [The method of continuous dosing of bulk materials], Russian Federation, 1999, Pat. 2138783. (In Russ.)

5. Pershin V.F., Vorob'yev A.M., Nechayev V.M., Pas'ko A.A., Alsayyad T.Kh.K. [Two-stage continuous dosing in the production and use of carbon nanomaterials], *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye* [Chemical and oil and gas engineering], 2018, no. 6, pp. 12-14. (In Russ.)

6. Pershin V.F., Baryshnikova S.V., Kalyapin D.K., Osipov A.A. *Sposob nepreryvnogo dozirovaniya sypuchikh materialov i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya* [Method for continuous dosing of bulk materials and device for its implementation], Russian Federation, 2005, Pat. 2251083. (In Russ.)

7. Pershina S.V., Di Dzhinnaro A.I., Odnol'ko V.G., Osipov A.A., Pershin V.F., Yavnik P.M. *Ustroystvo dlya nepreryvnogo dvukhstadiynogo dozirovaniya uglerodnykh materialov* [Device for continuous two-stage dosing of carbon materials], Russian Federation, 2012, Utility model for a pat. 113353. (In Russ.)

8. Pershin V. F., Alsayyad T.Kh.K., Tkachev A.G., Baranov A.A., Osipov A.A. *Sposob nepreryvnogo vesovogo dozirovaniya sypuchego materiala i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya* [Method for continuous weight dosing of bulk material and device for its implementation], Russian Federation, 2019, Pat. 2691786. (In Russ.)

9. Makarov Yu.I. *Apparaty dlya smesheniya sypuchikh materialov* [Apparatus for mixing bulk materials], Moscow: Mashinostroyeniye, 1973, 216 p. (In Russ.)

10. Gusev Yu.I., Karasev I.N., Kol'man-Ivanov E.E. [et al.] *Konstruirovaniye i raschet mashin khimicheskikh proizvodstv* [Design and calculation of machines for chemical production], Moscow: Mashinostroyeniye, 1985, 408 p. (In Russ.)

11. Alsayyad T., Pershin V., Pasko A., Pasko T. Improving the Accuracy of Two-Stage Weight Feeding Technology of Bulk Solids, *AIP Conference Proceedings*, 2017, vol. 1899, no. 1, p. 060011, doi: 10.1063/1.5009882

12. http://www.thermo-ramsey.com (accessed 21 May 2022).

13. https://www.coperion.com/en/products-services/process-equipment/feeders (accessed 21 May 2022).

14. Dai J., Cui H., Grace J.R. Biomass Feeding for Thermochemical Reactors, *Progress in Energy and Combustion Science*, 2012, vol. 38, no. 5, pp. 716-736, doi: 10.1016/j.pecs.2012.04.002

15. Molinder R., Wiinikka H. Feeding Small Biomass Particles at Low Rates, *Powder Technology*, 2015, vol. 269, pp. 240-246, doi: 10.1016/j.powtec.2014.09.010

16. Tahira F., Palmerb J., Khooc J. [et al.] Development of Feed Factor Prediction Models for Loss-in-Weight Powder Feeders, *Powder Technology*, 2019, vol. 364, pp. 1025-1038, doi: https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.09.071

17. Engisch W.E., Muzzio F.J. Method for Characterization of Loss-in-Weight Feeder Equipment, *Powder Technology*, 2012, vol. 228, pp. 395-403, doi: 10.1016/j.powtec.2012.05.058

18. Hanson J. Control of a System of Loss-in-Weight Feeders for Drug Product Continuous Manufacturing, *Powder Technology*, 2018, vol. 331, pp. 236-243, doi: 10.1016/j.powtec.2018.03.027

19. Madarásza L., Köte Á., Gyürkésa M. [et al.] Videometric Mass Flow Control: A New Method for Real-Time Measurement and Feedback Control of Powder Micro-Feeding Based on Image Analysis, *International Journal of Pharmaceutics*, 2020, vol. 580, p. 119223, doi: 10.1016/j.ijpharm.2020.119223.

20. Al'-Dzharakh R.A., Al'-Mashkhadani A.M., Mansur V., Al'davud S.S., Osipov A.A., Pershin V.F. [Production of graphene-containing suspensions and concentrates by cascade graphite exfoliation], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2022, vol. 28, no. 1, pp. 139-152, doi: 10.17277/vestnik.2022.01.pp.139-152 (In Russ., abstract in Eng.)

Aggregate zur Herstellung der Mischung aus den Komponenten, die zur Segregation neigen: moderner Zustand und Perspektiven. Teil I.

Zusammenfassung: Es sind die wichtigsten Verfahren zum Dosieren und Mischen sowie Vorrichtungen zur Durchführung dieser Verfahren betrachtet. Es ist gezeigt, dass der Hauptgrund, der die Erhöhung der Dosiergenauigkeit behindert, die dynamischen Effekte auf den Gewichtssensor sind, da das Gewicht des Materials während seiner Bewegung bestimmt wird. Die Analyse der zweistufigen Technologie der gewichtskontinuierlichen Dosierung ist durchgeführt. Es ist darauf hingewiesen, dass diese Technologie im Hinblick auf die Erhöhung der Dosiergenauigkeit am vielversprechendsten ist. Verbesserungsmöglichkeiten der zweistufigen Dosiertechnik und Geräte zu ihrer Umsetzung sind skizziert. Die Notwendigkeit, die Prozesse der Dosierung von Komponenten und deren Vermischung unter Berücksichtigung ihrer Beziehung zu berücksichtigen, ist aufgezeigt.

Unités de mélange à partir les composantes sujettes à la ségrégation: état actuel et perspectives. Première partie

Résumé: Sont examinés les principales méthodes de dosage et de mélange, ainsi que les dispositifs permettant de mettre en œuvre ces méthodes. Est démontré que la principale raison qui empêche l'amélioration de la précision du dosage est l'impact dynamique sur le capteur de poids, car le poids du matériau est déterminé pendant son mouvement. Est faite une analyse de la technologie de dosage continu en deux étapes. Est note qu'en termes d'amélioration de la précision du dosage, cette technologie est la plus prometteuse. Sont identifiés les moyens d'améliorer la technologie de dosage en deux étapes et les dispositifs pour sa mise en œuvre Est montrée la nécessité d'examiner les processus de dosage des composants et de leur mélange ensemble, en tenant compte de leur relation.

Авторы: ***Мансур Васем*** **–** аспирант кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; ***Першин Владимир Федорович*** **–** доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

УДК 621.91.01
DOI: 10.17277/vestnik.2022.04.pp.674-684

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАСЧЕТА ПРИПУСКА НА МЕХАНИЧЕСКУЮ ОБРАБОТКУ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ СРЕДЫ ПРОГРАММИРОВАНИЯ PYTHON

Н. В. Бондаренко, М. В. Соколов

Кафедра «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», msok68@mail.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия

Ключевые слова: алгоритм; база данных; межоперационные переходы; припуск на механическую обработку деталей; программа.

Аннотация: Рассмотрена и решена задача расчета рационального припуска с использованием среды программирования Python. Разработаны алгоритм и программа для расчета рационального припуска и определения необходимого количества переходов для достижения заданных конструкторской документацией параметров шероховатости поверхности и точности размеров.

Одной из проблем современного машиностроения является определение припуска, который необходимо снять с заготовки, для того чтобы обеспечить необходимые геометрическую точность и чистоту поверхности детали. Формулы для расчета припуска представлены в работе [1].

Определение рациональной толщины припуска на обработку является важной технико-экономической задачей. Маленький припуск может не обеспечить заданных параметров шероховатости детали. Кроме того, на заготовке может сохраниться дефектный слой с предыдущей операции, что приведет к браку. Большие припуски могут привести к экономическим потерям, так как придется снимать много материала для достижения заданных параметров.

Для решения данной проблемы применяют два метода: аналитический и справочный. Первый позволяет точно рассчитать максимальный, минимальный и номинальный припуски на операцию, но при этом требует времени для выполнения расчетов и их проверки, особенно, когда деталь имеет сложную конфигурацию. Поэтому наибольшее распространение получил справочный метод, определяющий величину припуска по машиностроительным справочникам, которая составляется на основе данных, полученных на предприятиях. Данный метод более быстрый, но менее точный. При разработке технологического процесса инженеры-технологи чаще используют свои знания и личный опыт при назначении последовательности операций механической обработки.

Однако в современном машиностроении пользоваться справочниками не всегда удобно. Поэтому в качестве еще одного варианта для определения припуска могут применяться специальные программы, которые по исходным данным способны рассчитать припуск. Тем не менее программы имеют ряд недостатков.

Во-первых, подобные программы нуждаются в поддержке и обновлениях, так как исходные данные для расчетов программы получают не только от пользователя, но и от баз данных, встроенных в программу. Если базы данных не обновлять своевременно, то программа будет выдавать неточные результаты расчетов, которые не соответствуют реальным условиям механической обработки.

Во-вторых, недостаточная кросс-платформенность программы. Для того чтобы программа работала, ее необходимо установить на компьютер или смартфон со всеми необходимыми библиотеками или базами данных, но из-за большого их количества занимаемая физическая память программы оказывается огромной, что затрудняет ее установку на слабых устройствах. Эту проблему можно решить при помощи облачных вычислений, когда все базы данных хранятся на сервере, и там же происходят вычисления, при этом не следует устанавливать программу, а для ее активации достаточно будет зайти на сайт разработчика.

К преимуществам программы можно отнести ее высокую скорость работы, при рациональной реализации – кросс-платформенность, применение современных технологий для реализации, а, также перспективу ее развития, так как в дальнейшем к этой программе можно подключать дополнительные модули, расширяющие ее возможности.

Вопросы обеспечения качества изделий на стадии технологической подготовки производства, рассмотренные при проектировании системы поддержки принятия решений выбора режимных и конструктивных параметров, изложены в работах [2 – 4].

Для определения припуска инженер должен знать, какая заготовка будет использоваться при изготовлении детали. Как правило, материал для заготовки подбирает конструктор, используя справочную литературу – сортаменты, ГОСТы, ОСТы и др.

В качестве первого этапа определения припуска выступает определение необходимого количества операций. Для этого определяют коэффициент уточнения ε_i

$$\varepsilon_i = T_{i-1}/T_i\,, \tag{1}$$

где T_{i-1}, T_i – допуски на размер, полученные соответственно на предыдущей и выполняемой технологических операциях.

Так как для получения детали из заготовки, заготовка должна пройти через несколько операций, определяют общий коэффициент уточнения $\varepsilon_{\text{о}}$

$$\varepsilon_{\text{о}} = \prod_{i=1}^{i=k} i, \tag{2}$$

где k – количество операций.

Далее определяют требуемое уточнение, которое необходимо обеспечить при обработке:

$$\varepsilon_{\text{ТО}} = T_{\text{з}}/T_{\text{д}}, \tag{3}$$

где $T_{\text{з}}$, $T_{\text{д}}$ – допуски на размеры соответственно заготовки и детали.

Сравнивают $\varepsilon_{\text{о}}$ и $\varepsilon_{\text{ТО}}$. Если количество операций подобрано правильно, то

$$\varepsilon_{\text{о}} \le \varepsilon_{\text{ТО}}. \tag{4}$$

Выполнение неравенства (4) гарантирует достижение требуемой точности (3). Затем переходят к определению припуска.

Расчеты ведут по трем формулам – для определения минимального, номинального и максимального припусков (формулы могут различаться, в зависимости от операции и типа обрабатываемой поверхности):

$$Z_{i\,\min} = Rz_{(i-1)} + h_{i-1} + \Delta_{i-1} + \varepsilon_{i-1}; \tag{5}$$

$$Z_i = Z_{i\,\min} + eiD_{i-1} + esD_i; \tag{6}$$

$$Z_{i\,\max} = Z_{i\,\min} + ITD_{i-1} + ITD_i\,, \tag{7}$$

где Rz – высота неровностей поверхности; h – глубина дефектного слоя; Δ – суммарные отклонения расположения поверхностей; ε – погрешность установки заготовки; eiD_{i-1}, esD_i – предельные отклонения размеров соответственно на предшествующем и выполняемом переходах; ITD_{i-1}, ITD_i – допуски на получаемый размер соответственно на предшествующем и выполняемом переходах.

Параметры Rz и h можно определить как по справочной литературе, так и практическими методами, например, измерив шероховатость поверхности детали на профилометре или сравнивая с образцами шероховатости. Коэффициент Δ чаще всего выбирают с использованием справочной литературы, а коэффициент ε можно измерить непосредственно на заготовке, установленной в приспособление на станке.

Когда припуск на механическую обработку рассчитан, определяют межпереходные размеры. Формула для определения межоперационных размеров при обработке поверхностей вращения имеет следующий вид:

$$D_{i-1} = D_i - Z_i, \tag{8}$$

где D_i, D_{i-1} – номинальные размеры соответственно на i-м и предшествующем переходах; Z_i – номинальный припуск на i-м переходе.

Определив межпереходные размеры толщину припуска на обработку, можно, для наглядности, изобразить их расположение на эскизе (рис. 1).

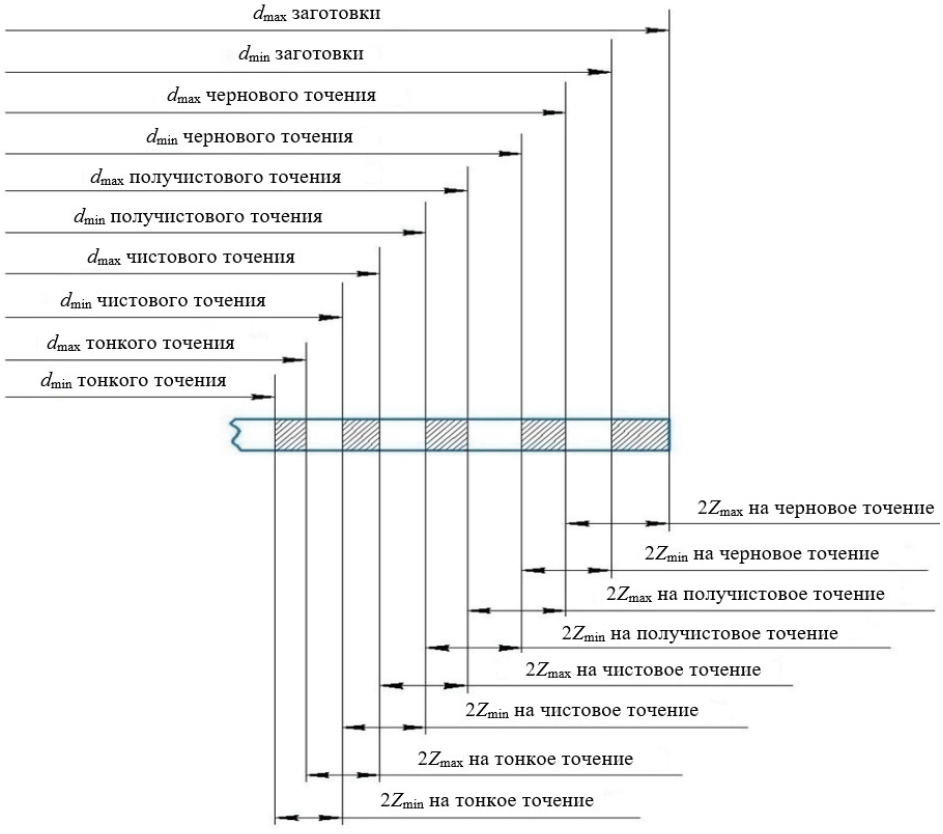


Рис. 1. Расположение припусков и межоперационных размеров для токарной обработки внешней цилиндрической поверхности

За последние двадцать лет отрасль «Машиностроение» сделала большой скачок в развитии. Чтобы поддержать эффективность и конкурентоспособность, предприятия машиностроения постоянно внедряют инновации и цифровые технологии. Однако, несмотря на то, что все больше и больше появляется станков с числовым программным управлением (**ЧПУ**) с относительно простым пользовательским интерфейсом, которые позволяют более экономично использовать рабочее пространство и проще настраиваются на обработку деталей, множество инженерных задач все еще остается нерешенным.

Так как основными задачами машиностроения являются непрерывное повышение качества машин и оборудования и совершенствование роста производительности труда на предприятиях, то автоматизация инженерных расчетов позволит повысить производительность труда за счет того, что инженер сможет быстрее разработать технологический процесс и выполнить остальные необходимые действия.

В России большой популярностью пользуются системы автоматизированного проектирования компании «Аскон», в частности «Компас-3D» и «Вертикаль». Система «Компас-3D» помогает создавать чертежи и модели деталей, а «Вертикаль» – техпроцессы и заполнять маршрутные, операционные и эскизные карты. Если первая достаточно проста в освоении, то вторую придется изучать. Система «Вертикаль» работает с библиотеками или базами данных, которые можно создавать самостоятельно. Однако «Компас-3D» и «Вертикаль» не могут рассчитывать припуски и режимы резания для операций, а значит, разработка программы, способной выполнять такие расчеты, актуальна.

Разработка любой программы происходит в среде программирования. Существует множество различных языков программирования, некоторые из них больше подходят для создания сайтов (PHP), другие – универсальные, но сложные в усвоении (C++, C#) – они подходят для написания сложных программ, которые могут работать с трехмерными объектами. Но для создания программ для инженерных расчетов использование вышеперечисленных языков не обязательно.

Среди программистов принято считать Python низкоуровневым языком программирования, подходящим новичкам для написания простых программ. Однако функционал этого языка гораздо шире. Он действительно простой – освоить Python можно за две-три недели, при том, если пользователь совершит ошибку, среда программирования сразу укажет место и причину ошибки, что позволяет сразу же ее исправить. Кроме того, для Python существует множество библиотек, которые являются бесплатными (как и он сам), что позволяет проводить сложные вычисления, работать с 3D-моделями и базами данных.

Кроме того, Python позволяет работать с нейронными сетями. Нейронная сеть (нейросеть) – математическая модель (а также ее программное или аппаратное воплощение), построенная по принципу организации и функционирования биологических нейронных сетей – сетей нервных клеток живого организма [5]. В машиностроении нейросети пока не применяют, однако, скорее всего, дальнейшее развитие нейросетей приведет к тому, что они станут применяться повсеместно [4].

Приведем примеры наиболее известных и популярных библиотек:

– SciPy – библиотека, используемая учеными, аналитиками и инженерами, занимающимися научными и техническими вычислениями. Она содержит модули для решения задач оптимизации, линейной алгебры, интерполяции специальных функций, а также обработки сигналов и изображений [6];

– Matplotlib – библиотека Python для построения 2D-графиков, которая позволяет получать изображения в интерактивных кроссплатформенных средах. С ее помощью создают графики, гистограммы, спектры мощности, диаграммы ошибок и диаграммы разброса [6];

– OpenPyXL – библиотека, позволяющая Python считывать, изменять и использовать в расчетах данные из программы MSExcel, на основе которой можно создавать простые базы данных в виде таблиц;

– OpenCV – библиотека, рассчитанная на работу с «машинным зрением», ее часто используют при обучении нейросетей работе с изображениями;

– Tensorflow и Keras – мощные библиотеки AI (ИИ) для написания нейросетей. Используя их, можно разработать абсолютно любую нейросеть – от простейшего распознавания рукописных цифр до управления автомобилем в режиме реального времени [7];

– NumPy – один из самых основных пакетов в Python – универсальный пакет для обработки массивов. Он представляет высокопроизводительные объекты многомерных массивов и инструменты для работы с ними [7].

Кроме того, на Python уже существуют программы, позволяющие решать разные инженерные задачи, например FreeCAD.

FreeCAD – бесплатная программа для параметрического трехмерного компьютерного проектирования с поддержкой метода конечных элементов. Она предназначена для машиностроения, но расширяется до более широкого круга применений, включая архитектуру или электротехнику. Python используется в качестве языка сценариев внутри FreeCAD. Пользователи могут самостоятельно расширять с его помощью функции приложения [6].

Несмотря на все преимущества Python, у него есть и недостатки: для работы со сложными библиотеками, к которым относятся Tensorflow и Keras, необходимо четкое понимание их работы, чтобы избежать ошибок при написании кода программы, но в российском сегменте Интернета очень мало справочной информации о работе библиотек, и существуют лишь ограниченные примеры их использования, что не позволяет самостоятельно разобраться во всех нюансах их работы. В то же время, некоторые библиотеки могут конфликтовать друг с другом из-за несовместимости версий, что ведет к сбоям во время работы программы. Однако для начинающих программистов Python является наиболее простым и удобным языком программирования, поэтому для разработки программы для расчета припуска под механическую обработку будем использовать именно его.

В первую очередь необходимо установить своеобразные «границы», в рамках которых разрабатывается программа. Так, например, нет необходимости разрабатывать интерфейс программы – это займет долгое время, а кроме того, потребует переработать код программы с учетом расположения виджетов – кнопок, окон, ползунков и прочих элементов. Первостепенной задачей является написание рабочего кода, который будет выполнять расчеты и выводить результат, а разработать интерфейс можно будет потом. В ходе практических исследований разработан прототип программы, который в дальнейшем будет обрастать новыми возможностями.

Так как программа работает с табличными значениями, необходимо их перенести в отдельный электронный формат. Обычно в таких случаях используют систему управления базами данных (**СУБД**), например – Microsoft Access, Database.NET, MySQLWorkbench и др. [8]. Но в данном случае нет необходимости их использовать, так как можно пойти по более легкому пути и создать файл формата .xlxs, то есть таблицу Microsoft Excel. У Python есть отдельная библиотека для работы с такими файлами, которая будет использоваться. Это позволит упростить задачу и сэкономить время при разработке программы, так как Microsoft Excel, в отличии от СУБД, не так сложен в изучении.

На данном этапе необходимо определить параметры Rz, h и Δ, указанные в таблицах 2.5 – 2.13 [1]. Для использования их в Python, создадим такие же таблицы в Excel с данными о прокате (табл. 1) и погрешности $\Delta_к$ (табл. 2).

Таблица 1

Качество поверхности сортового проката

Диаметр проката, мм	Точность проката, мкм					
	Высокая		Повышенная		Обычная	
	Rz	*h*	*Rz*	*h*	*Rz*	*h*
До 30	63	50	80	100	125	150
Свыше:						
30 до 80	100	75	125	150	160	250
80 до 180	125	100	160	200	200	300
180 до 250	200	200	250	300	320	400

Таблица 2

Кривизна профиля сортового проката

Характеристика проката, мм	Длина проката, мкм на 1 мм				
	До 120	120…180	180…315	315…400	400…500
Без правки при точности проката:					
обычной	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
повышенной	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
высокой	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5

Чтобы функционал программы не был ограничен одним лишь прокатом, необходимо создать больше таблиц с информацией о разных заготовках.

Параметр Δ, согласно [1], определяется по разным формулам, в зависимости от способа закрепления заготовки. Большая часть формул включает в себя два параметра: $\Delta_к$ и $\Delta_{см}$ – кривизну заготовки и отклонение от соосности соответственно. Сами формулы будут прописаны в коде программы отдельно, а параметры $\Delta_к$ и $\Delta_{см}$ будем использовать как переменные, значения которым зададим из таблицы.

Далее библиотеку OpenPyXl подключаем к программе в 3-й строке (рис. 2).

Затем импортируем из нее функцию load_workbook, позволяющую работать с конкретным файлом, который подключаем в 6-й строке, а для подтверждения подключения прописываем строку 7: print (wb.sheetnames) – эта команда выведет номер активный страницы на экран. Восьмая строка делает данную страницу активной, что позволит вносить и извлекать данные из ранее созданной таблицы.

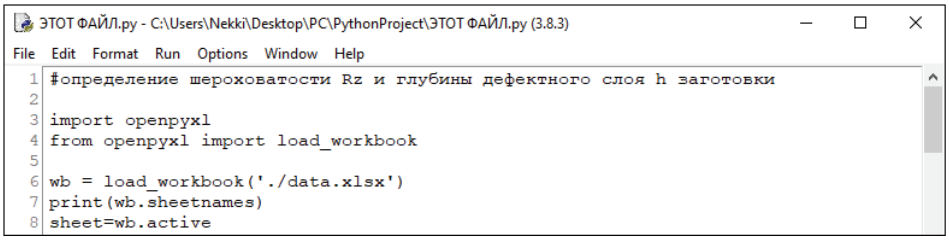


Рис. 2. Подключение библиотеки OpenPyXl

После запуска программы происходит проверка подключения (рис. 3). Программа вывела номер страницы, что означает следующее: прописанный выше код был правильным. Затем начинается выполнение самого кода, но прежде чем приступить к расчетам, необходимо добавить цикл, который не будет выключать программу после окончания расчетов, чтобы выполнять разные расчеты без ее перезапуска (рис. 4, *а*).

В строке 10 создается переменная index типа integer, хранящая в себе целочисленное значение, в данном случае она равна нолю, а в строке 11 – сам цикл while, который дословно переводится как «пока». Это означает, что пока index = 0, программа будет работать. Когда же пользователь захочет прекратить работать с программой и закрыть ее, ему будет предложен выбор (рис. 4, *б*). Если пользователь выберет ответ «Да», то программа продолжит работать, если «Нет» – программа закроется. В дальнейшем будет реализована еще одна функция, которая позволит пользователю сохранить расчеты в отдельный файл при закрытии программы.

Далее реализуем основной код программы. Сначала узнаем у пользователя, для какой операции проводятся расчеты, и в зависимости от ответа будем использовать соответствующие формулы (рис. 5). В строке 13 создаем переменную operaciya типа string, которая может хранить в себе слово или фразу (см. рис. 5, *а*). Для того чтобы присвоить данной переменной значение, используется команда input, позволяющая пользователю напечатать нужное значение в терминале. Но в данном случае пользователю нет необходимости писать слово – варианты операций уже предложены на экране и все они имеют свой номер, достаточно лишь указать его. Примечательно, что в данном случае использовать переменную типа integer (int) нельзя, так как команда input не работает с этим типом переменной.

Затем создаем цикл if-elif-else, который работает по следующему принципу: команда if получает заданное условие, а затем выполняет действие, соответствующее этому условию (см. рис. 5, *б*). В данном случае после if стоит условие: переменная operaciya должна хранить значение 1. Если это условие выполняется, то расчет происходит по формуле, написанной в 587-й строке, после чего выводится

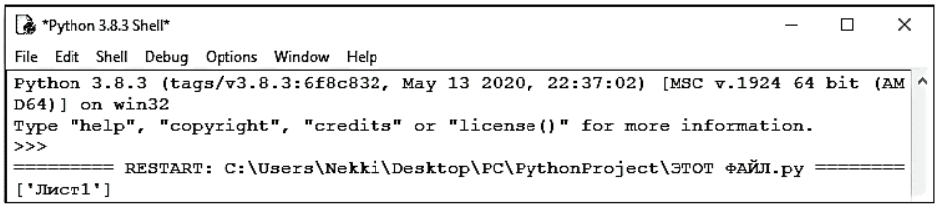


Рис. 3. Проверка подключения библиотеки OpenPyXl

```
10 index=int=0
11 while index==0:
```

а)

```
651 pr=str(input("Продолжить?(Да/Нет)"))
652 if pr=="Да":
653     index=0
654 else:
655     index=1
```

б)

Рис. 4. Начало (а) и конец (б) цикла программы

```
13    operaciya = str(input("Укажите тип операции:\n"
14                          "[1]Токарная (только внешняя или только внутренняя обработка)\n"
15                          "[2]Токарная (одновременная обработка внутренней и внешней поверхностей)\n"
16                          "[3]Фрезерная\n"))
```

а)

```
585     if operaciya=="1":
586         Zmin = float
587         Zmin = 2*(Rz+h+Delta+ε)
588         print("2Zmin = ",Zmin,"мкм.")
589     elif operaciya=="2":
590         Zmin = float
591         Zmin = 2*(Rz+h)+2*(((Delta**2)+(ε**2))**0,5)*(Rz+h+Delta+ε)
592         print(Zmin)
593     elif operaciya=="3":
594         Zmin = float
595         Zmin = Rz+h+Delta+ε
596         print(Zmin)
597     else:
598         print("Данные отсутствуют!")
```

б)

Рис. 5. Определение типа операции (*а*) и припуска для конкретно указанной операции (*б*)

результат. Если переменная operaciya хранит значение 2, то программа пропускает строки 586, 587, 588 и начинает выполнять строки 590, 591, 592 и так далее, до тех пор, пока цикл не будет закрыт командой else (в данном случае эта команда просто прекратит выполнение всей программы).

Затем, когда пользователь выбрал операцию, он должен указать заготовку и некоторые ее характеристики – точность для проката, массу и способ изготовления для штамповки, диаметр, массу и способ изготовления для поковки. Данную информацию можно получить либо с основной надписи чертежа, либо у завода-изготовителя заготовки, либо просто замерив необходимые параметры у заготовки (последнее необходимо, если заготовкой является литая деталь). После указания необходимых параметров будут созданы две переменные типа float, которые содержат в себе дробные значения: шероховатость и глубина дефектного слоя материала – *Rz* и *h*. Таким образом, определены два параметра для расчета припуска.

На рисунке 6 в качестве примера приведен отрывок кода для подбора шероховатости и глубины дефектного слоя для заготовки из проката высокой, повышенной и обычной точности. Вне зависимости от выбранной точности программа попросит пользователя указать диаметр проката, от которого уже будет зависеть значение, присваиваемое *Rz* и *h*. При выполнении кода программа выведет присвоенные значения (рис. 7).

Как можно видеть, если пользователь укажет, что заготовка изготовлена из проката высокой точности диаметром 85 мм, то шероховатость поверхности заготовки составит 125 мкм, а глубина дефектного слоя – 100 мкм. Для того чтобы убедиться в правильности выбранных параметров и работоспособности программы, сравним полученные значения с табличными [1, табл. 2.5], которые ранее перенесены в Microsoft Excel (см. табл. 1).

По результатам сравнительного анализа расчетных и табличных значений для диаметра проката 80…180 мм при высокой точности шероховатость составит 125 мкм, а глубина дефектного слоя – 100 мкм, что соответствует данным, полученным в ходе выполнения программы. Таким образом, удалось реализовать часть кода программы, который определяет *Rz* и *h* для одного типа заготовок.

ЭТОТ ФАЙЛ.py - C:\Users\Nekki\Desktop\PC\PythonProject\ЭТОТ ФАЙЛ.py (3.8.3)

File Edit Format Run Options Window Help

```
19      Zagotovka = str(input("Укажите заготовку (прокат, поковка, штамповка, литьё): "))
20      Rz = float
21      h = float
22      if Zagotovka=="прокат":
23          type_of_prokat = str(input("Укажите точность проката (высокая, повышенная, обычная): "))
24          diametr = float(input("Укажите диаметр проката (мм): "))
25          L = float(input("Укажите длину заготовки в мм: "))
26          if type_of_prokat=="высокая":
27              if diametr<=30:
28                  print("Rz =",sheet['D6'].value,"мкм;", "h =",sheet['E6'].value, "мкм.")
29                  Rz = sheet['D6'].value
30                  h = sheet['E6'].value
31              elif 30<diametr<=80:
32                  print("Rz =",sheet['D7'].value,"мкм;", "h =",sheet['E7'].value, "мкм.")
33                  Rz = sheet['D7'].value
34                  h = sheet['E7'].value
35              elif 80<diametr<=180:
36                  print("Rz =",sheet['D8'].value,"мкм;", "h =",sheet['E8'].value, "мкм.")
37                  Rz = sheet['D8'].value
38                  h = sheet['E8'].value
39              elif 180<diametr<=250:
40                  print("Rz =",sheet['D9'].value,"мкм;", "h =",sheet['E9'].value, "мкм.")
41                  Rz = sheet['D9'].value
42                  h = sheet['E9'].value
43              else:
44                  print("Введены неверные данные!")
45
46          elif type_of_prokat=="повышенная":
47              if diametr<=30:
48                  print("Rz =",sheet['F6'].value,"мкм;", "h =",sheet['G6'].value, "мкм.")
49                  Rz = sheet['F6'].value
50                  h = sheet['G6'].value
51              elif 30<diametr<=80:
52                  print("Rz =",sheet['F7'].value,"мкм;", "h =",sheet['G7'].value, "мкм.")
53                  Rz = sheet['F7'].value
54                  h = sheet['G7'].value
55              elif 80<diametr<=180:
56                  print("Rz =",sheet['F8'].value,"мкм;", "h =",sheet['G8'].value, "мкм.")
57                  Rz = sheet['F8'].value
58                  h = sheet['G8'].value
59              elif 180<diametr<=250:
60                  print("Rz =",sheet['F9'].value,"мкм;", "h =",sheet['G9'].value, "мкм.")
61                  Rz = sheet['F9'].value
62                  h = sheet['G9'].value
63              else:
64                  print("Введены неверные данные!")
65
66          elif type_of_prokat=="обычная":
67              if diametr<=30:
68                  print("Rz =",sheet['H6'].value,"мкм;", "h =",sheet['I6'].value, "мкм.")
69                  Rz = sheet['H6'].value
70                  h = sheet['I6'].value
71              elif 30<diametr<=80:
72                  print("Rz =",sheet['H7'].value,"мкм;", "h =",sheet['I7'].value, "мкм.")
73                  Rz = sheet['H7'].value
74                  h = sheet['I7'].value
75              elif 80<diametr<=180:
76                  print("Rz =",sheet['H8'].value,"мкм;", "h =",sheet['I8'].value, "мкм.")
77                  Rz = sheet['H8'].value
78                  h = sheet['I8'].value
79              elif 180<diametr<=250:
80                  print("Rz =",sheet['H9'].value,"мкм;", "h =",sheet['I9'].value, "мкм.")
81                  Rz = sheet['H9'].value
82                  h = sheet['I9'].value
83              else:
84                  print("Введены неверные данные!")
```

Рис. 6. Определение шероховатости и глубины дефектного слоя заготовки

```
Укажите заготовку (прокат, поковка, штамповка, литьё): прокат
Укажите точность проката (высокая, повышенная, обычная): высокая
Укажите диаметр проката (мм): 85
Укажите длину заготовки в мм: 100
Rz = 125 мкм; h = 100 мкм.
```

Рис. 7. Определение шероховатости и глубины дефектного слоя заготовки в зависимости от введенных параметров

Список литературы

1. Расчет припусков и межпереходных размеров в машиностроении / Я. М. Радкевич, В. А. Тимирязев, А. Г. Схиртладзе, М. С. Островский ; под ред. В. А. Тимирязева. – Изд. 2-е, стер. – М. : Высш. школа, 2007. – 272 с.
2. Концепция создания системы автоматизированного проектирования процессов резания в технологии машиностроения / С. И. Пестрецов, К. А. Алтунин, М. В. Соколов, В. Г. Однолько. – М. : Спектр, 2012. – 212 с.
3. Altunin, K. A. Development of Information Support for Intelligent Cad of Cutting Processes / K. A. Altunin, M. V. Sokolov // Advanced Materials and Technologies. – 2017. – No. 2. – P. 67 – 77. doi: 10.17277/amt.2017.02.pp.067-077
4. Алтунин, К. А. Применение нейронных сетей для моделирования процесса токарной обработки / К. А. Алтунин, М. В. Соколов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 1. – С. 122 – 133. doi: 10.17277/vestnik.2016.01.pp.122-133
5. Кравченко, С. Примеры использования Python, вдохновляющие на его изучение. – Текст : электронный / С. Кравченко // Proglib. – URL : https://proglib.io/p/primery-ispolzovaniya-python-vdohnovlyayushchie-na-ego-izuchenie-2021-02-21 (дата обращения: 10.09.2022).
6. Сайт FreeCAD. – URL : https://www.freecadweb.org/index.php?lang=ru (дата обращения: 10.09.2022).
7. Топ-10 библиотек Python для Data Science. – Текст : электронный // DataStart. – URL : https://datastart.ru/blog/read/top-10-bibliotek-python-dlya-data-science (дата обращения: 10.09.2022).
8. Программы для работы с базами данных. – Текст : электронный // Lumpics.ru. – URL : https://lumpics.ru/database-software (дата обращения: 10.09.2022).

Development of an Algorithm for Calculation of the Allowance for Mechanical Processing of Parts for the Python Programming Environment

N. V. Bondarenko, M. V. Sokolov

Department of Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering, msok68@mail.ru; TSTU, Tambov, Russia

Keywords: algorithm; database; interoperational transitions; allowance for machining parts; program.

Abstract: The problem of calculating a rational allowance using the Python programming environment is considered and solved. An algorithm and a program have been developed for calculating the rational allowance and determining the required number of transitions to achieve the parameters of surface roughness and dimensional accuracy specified by the design documentation.

References

1. Radkevich Ya.M., Timiryazev V.A. [Ed.], Skhirtladze A.G., Ostrovskiy M.S. *Raschet pripuskov i mezhperekhodnykh razmerov v mashinostroyenii* [Calculation of allowances and intertransitional dimensions in mechanical engineering], Moscow: Vysshaya shkola, 2007, 272 p. (In Russ.)

2. Pestretsov S.I., Altunin K.A., Sokolov M.V., Odnol'ko V.G. *Kontseptsiya sozdaniya sistemy avtomatizirovannogo proyektirovaniya protsessov rezaniya v tekhnologii mashinostroyeniya* [The concept of creating a system for automated design of cutting processes in engineering technology], Moscow: Spektr, 2012, 212 p. (In Russ.)

3. Altunin K.A., Sokolov M.V. Development of Information Support for Intelligent Cad of Cutting Processes, *Advanced Materials and Technologies*, 2017, no. 2, pp. 67-77, doi: 10.17277/amt.2017.02.pp.067-077 (In Eng., abstract in Russ.)

4. Altunin K.A., Sokolov M.V. [Application of neural networks for modeling the process of turning], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 1, pp. 122-133, doi: 10.17277/vestnik.2016.01.pp.122-133(In Russ., abstract in Eng.)

5. https://proglib.io/p/primery-ispolzovaniya-python-vdohnovlyayushchie-na-ego-izuchenie-2021-02-21 (accessed 10 September 2022).

6. https://www.freecadweb.org/index.php?lang=ru (accessed 10 September 2022).

7. https://datastart.ru/blog/read/top-10-bibliotek-python-dlya-data-science (accessed 10 September 2022).

8. https://lumpics.ru/database-software (accessed 10 September 2022).

Entwicklung eines Algorithmus für Berechnung der Zulage zur mechanischen Bearbeitung von Teilen für die Python-Programmierumgebung

Zusammenfassung: Es ist das Problem der Berechnung eines rationalen Aufmaßes mit der Programmierumgebung Python betrachtet und gelöst. Es sind ein Algorithmus und ein Programm zur Berechnung des rationalen Aufmaßes und zur Bestimmung der erforderlichen Anzahl von Übergängen entwickelt, um die in der Konstruktionsdokumentation angegebenen Parameter der Oberflächenrauheit und Maßhaltigkeit zu erreichen.

Élaboration d'un algorithme de calcul de l'allocation sur l'usinage de pièces pour l'environnement de programmation Python

Résumé: Est examiné et résolu le problème du calcul de l'allocation rationnelle en utilisant l'environnement de programmation Python. Sont élaborés un algorithme et un programme d'allocation rationnelle pour calculer et déterminer le nombre nécessaire de transitions pour atteindre les paramètres de rugosité de surface et de précision dimensionnelle spécifiés par la documentation de conception.

Авторы: ***Бондаренко Никита Владимирович*** **–** магистрант; ***Соколов Михаил Владимирович*** – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

НАШИ НОВЫЕ ПРОФЕССОРА, ДОКТОРА И КАНДИДАТЫ НАУК

NEW PROFESSORS, DOCTORS AND CANDIDATES OF SCIENCES

Акулинин Евгений Игоревич

Akulinin Evgeniy

Доцент кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств» ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов.

21 апреля 2022 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.02 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитил диссертацию на тему «Методология исследования и проектирования ресурсосберегающих циклических адсорбционных процессов и установок разделения газовых смесей» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки).

Работа выполнена на кафедре «Технологии и оборудование пищевых и химических производств» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

Научный консультант – д-р техн. наук, профессор Д. С. Дворецкий.

В диссертации разработана методология проектирования ресурсосберегающих технологических процессов и установок адсорбционного разделения газовых смесей с циклически изменяющимся давлением, включающая методику определения кинетических коэффициентов массопереноса в рабочем диапазоне температур, давлений, расходов смеси; методику формирования математической модели массо- и теплообменных процессов адсорбции-десорбции в грануле адсорбента, слое адсорбента и между адсорберами установки короткоцикловой безнагревной адсорбции (КБА); математическую модель динамики циклических адсорбционных процессов и многоадсорберных установок разделения газовых смесей; алгоритмы решения задач оптимизации режимов функционирования установки КБА при выбранном аппаратурном оформлении и оптимального проектирования аппаратурно-технологического оформления ресурсосберегающих адсорбционных установок в условиях неопределенности ряда параметров.

Разработаны и внедрены ресурсосберегающие установки, реализующие циклические процессы КБА для обогащения воздуха кислородом, оригинальные конструкции адсорберов для осуществления процессов очистки и разделения воздуха, аппаратно-программный комплекс для исследования кинетики и динамики циклических адсорбционных процессов методами физического и математического моделирования. Созданы комплексы программ для исследования динамики адсорбции компонентов газовой смеси в неподвижном слое адсорбента в условиях циклически изменяющегося давления.

Приказом Минобрнауки России от 14 октября 2022 года № 1261/нк Е. И. Акулинину присуждена ученая степень доктора технических наук.

Область научных исследований: математическое моделирование и оптимальное проектирование процессов адсорбционного разделения газов.

Аль-Джарах Руаа Амер Салим

Аспирант кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов.

30 июня 2022 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.02 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитила диссертацию на тему «Разработка и расчет лопастных роторных диспергаторов для получения графеносодержащих суспензий» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (технические науки).

Научный руководитель – д-р техн. наук, профессор В. Ф. Першин.

Работа выполнена на кафедре «Техника и технологии производства нанопродуктов» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

Область научных интересов: процессы и оборудование для получения тонких суспензий.

Аль-Раммахи Али Абидалкарим Хабиб

Соискатель кафедры «Информационные системы и защита информации», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов.

30 июня 2022 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.05 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитил диссертацию на тему «Аналитические и процедурные модели для обработки информации при анализе развития заболеваний плодовых деревьев» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.25.05 – Информационные системы и процессы (технические науки).

Научный руководитель – д-р техн. наук, профессор Ю. Ю. Громов.

Работа выполнена на кафедре «Информационные системы и защита информации» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

Область научных интересов: моделирование информационных систем, методы анализа больших данных.

Попова Алена Алексеевна

Аспирант кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов.

30 июня 2022 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.02 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитила диссертацию на тему «Аппаратурно-технологическое оформление высокотемпературной щелочной активации карбонизата (на примере декстрина и оксида графена)» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки).

Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент И. Н. Шубин.

Работа выполнена на кафедре «Техника и технологии производства нанопродуктов» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

Область научных интересов: процессы получения активированных углеродных материалов, технологическое оборудование для реализации процесса активации.

Сари Фарах Аббас Обаид

Соискатель кафедры «Информационные системы и защита информации», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов.

30 июня 2022 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.05 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитил диссертацию на тему «Аналитические и процедурные модели для системы поддержки принятия решений врача невролога» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.25.05 – Информационные системы и процессы (технические науки).

Научный руководитель – д-р техн. наук, профессор Ю. Ю. Громов.

Работа выполнена на кафедре «Информационные системы и защита информации» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

Область научных интересов: моделирование интеллектуальных информационных систем, обработка графической информации.

Джубари Мохаммед Кадер Абдулрахман

Аспирант кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов.

5 июля 2022 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.02 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитил диссертацию на тему «Кинетические закономерности двухстадийного процесса мембранного разделения сточных вод, содержащих хлорид натрия, ацетат натрия и уксусную кислоту» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки).

Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент Н. В. Алексеева.

Работа выполнена на кафедре «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

Область научных интересов: мембранные процессы разделения жидких сред.

Аль-Маамари Гассан Абдулла Аблулвасиа

Соискатель кафедры «Информационные системы и защита информации», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов.

06 сентября 2022 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.05 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитил диссертацию на тему «Модели двухфакторной оценки параметров пользователя для поддержки принятия решений в информационной системе» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.25.05 – Информационные системы и процессы (технические науки).

Научный руководитель – д-р техн. наук, профессор В. В. Алексеев.

Работа выполнена на кафедре «Информационные системы и защита информации» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

Область научных интересов: моделирование информационных систем, методы анализа больших данных.

Аль-Бусаиди Саид Султан Саид

Соискатель кафедры «Мехатроника и технологические измерения», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов.

12 сентября 2022 на заседании диссертационного совета Д 212.260.05 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитил диссертацию на тему «Аналитические и процедурные модели информационных процессов анализа и улучшения деятельности испытательной лаборатории» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.25.05 – Информационные системы и процессы (технические науки).

Работа выполнена на кафедре «Мехатроника и технологические измерения» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

Научный руководитель – д-р техн. наук, профессор С. В. Пономарев.

Область научных интересов: исследование и моделирование информационных систем применительно к испытательным лабораториям, аккредитованным по требованиям ГОСТ ISO/IEC 17025-2019.

Залукаева Наталия Юрьевна

Старший преподаватель кафедры «Техника и технологии автомобильного транспорта», соискатель кафедры «Энергообеспечение предприятий и теплотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов.

04 октября 2022 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.05 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитила диссертацию на тему «Информационно-управляющая система процессом распределения топливных пеллет» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы (технические науки).

Научный руководитель – д-р техн. наук, доцент А. Н. Грибков.

Работа выполнена на кафедре «Энергообеспечение предприятий и теплотехника» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

Область научных интересов: информационно-измерительные и управляющие системы, процессы распределения топливно-энергетических ресурсов.

Удалова Анастасия Петровна

Соискатель кафедры «Радиотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов.

04 октября 2022 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.05 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитила диссертацию на тему «Информационно-измерительные системы неразрушающего контроля теплофизических характеристик композитных строительных материалов и изделий с использованием СВЧ-нагрева» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы (технические науки).

Научный руководитель – д-р техн. наук, профессор В. Н. Чернышов.

Работа выполнена на кафедре «Радиотехника» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

Область научных интересов: методы и реализующие их системы неразрушающего контроля теплофизических свойств композитных строительных материалов и изделий.