

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***

2023. Том 29. № 1.

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

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

*Основан в 1995 году
Выходит 4 раза в год*

<http://vestnik.tstu.ru>

**Россия Тамбов
Издательство ТГТУ**

Совет редакторов

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакция журнала «Вестник Тамбовского государственного технического университета».

Эл. почта: gatarova.nc@mail.tstu.ru

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

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

Компьютерная верстка: С. Ю. Прохорская.

Подписано в печать 11.04.2023. Дата выхода в свет 28.04.2023.

Формат 70×108/16. Усл. печ. л. 15,23; уч.-изд. л. 16,60. Тираж 100 экз. Цена свободная. Заказ 004.

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», 2023

© Коллектив авторов, 2023

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Leonid Pyasov, 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 «ГТТУ»

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

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

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

Подписной индекс в каталоге «Роспечать» – 20498

СОДЕРЖАНИЕ

Автоматика. Информатика.	
Управление. Приборы	6
Санников С. А., Мокрозуб В. Г., Калистратов М. С. Системный анализ процесса проектирования линий для электрохимической и химической обработки деталей.....	6
Артемова С. В., Каменская М. А., Ладынин А. И., Шмелева А. Г., Ву Чи Чиеп. Энергосберегающее управление процессами нагрева (на английском языке).....	17
Иванов А. В., Москвитин С. П., Иванов А. А., Лежнева Н. А. Определение аномальных измерений радиосигналов спутниковой радионавигационной системой методом статистической обработки невязок измерений	27
Борисенко А. Б., Немтинов В. А., Борисенко А. А. Применение стохастической SIR-модели для моделирования эпидемического процесса	41
Семенов М. Е., Холмуродов Ж. Б., Ножкин В. С. Идентификация скрытых объектов в условиях динамически меняющегося влагосодержания почвы	52
Алгазин Е. И. Общая концепция передвижения во временных структурах исследуемого параметра линейных систем автоматике	64
Баламутова А. А., Попов Н. С., Андреев А. В. Диагностика состояний функционирования объектов региональной экономики в проблеме устойчивого развития.....	75
Процессы и аппараты химических и других производств. Химия	91
Пахомов А. Н., Гатапова Н. Ц., Киладзе В. В., Орлов А. Ю. Моделирование неравномерной загрузки трубопроводных систем на примере сетей газораспределения	91
Капранова А. Б., Стенько Д. В., Бахаева Д. Д., Ватагин А. А., Лебедев А. Е. Факторы эффективности ротационного смешения зернистого сырья для киберфизической платформы	102
Иванов О. О., Тараканов А. Г., Куди К. А., Долгунин В. Н. Влияние структурно-кинематических характеристик гравитационного потока зернистой среды на эффекты сепарации по размеру и плотности	115
Промтов М. А., Шеина О. А. Применение метода фентон-окисления для обработки сточных вод сырных производств.....	127
Машиностроение. Металлообработка	139
Мансур В., Першин В. Ф. Агрегаты для приготовления смеси из компонентов, склонных к сегрегации: современное состояние и перспективы. Часть II	139
Пярых А. С., Тимофеев С. А., Ушаков В. А. Исследование качества резьбовой поверхности транспедикулярных винтов	153
Наши новые профессора, доктора и кандидаты наук	162
Указатели к тому 28, 2022	163
Содержание тома 28, 2022.....	163
Алфавитный указатель авторов.....	169

CONTENTS

Automation. Information Technology.	
Control. Instruments	6
Sannikov S. A., Mokrozub V. G., Kalistratov M. S. System Analysis of the Design Process of Lines for Electrochemical and Chemical Processing of Parts.....	6
Artemova S. V., Kamenskaia M. A., Ladynin A. I., Shmeleva A. G., Vu Tri Chien. Energy-Saving Control of the Heating Process (<i>in English</i>)....	17
Ivanov A. V., Moskvitin S. P., Ivanov A. A., Lezhneva N. A. Identification of Anomalous Measurements of Radio Signals by a Satellite Radio Navigation System by the Method of Statistical Processing of Measurement Discharges	27
Borisenko A. B., Nemtinov V. A., Borisenko A. A. Application of the Stochastic SIR Model for Simulation of the Epidemic Process.....	41
Semenov M. E., Kholmurodov Zh. B., Nozhkin V. S. Identification of Hidden Objects in Conditions of Dynamicly Changing Soil Moisture Content	52
Algazin E. I. General Concept of Movement in Time Structures of the Studied Parameter of Linear Automation Systems.....	64
Balamutova A. A., Popov N. S., Andreev A. V. Diagnostics of the Functioning States of the Regional Economy Objects in the Context of Sustainable Development	75
Chemical Engineering and Related Industries.	
Chemistry	91
Pakhomov A. N., Gatapova N. Ts., Kiladze V. V., Orlov A. Yu. Simulation of Uneven Loading of Pipeline Systems through the Example of Gas Distribution Networks	91
Kapranova A. B., Stenko D. V., Bahaeva D. D., Vatagin A. A., Lebedev A. E. Efficiency Factors of Rotary Mixing of Granular Raw Materials for the Cyber-Physical Platform.....	102
Ivanov O. O., Tarakanov A. G., Kudi K. A., Dolgunin V. N. The Influence of the Structural and Kinematic Characteristics of the Gravitational Flow of a Grain Medium on the Effects of Separation by Size and Density	115
Promptov M. A., Sheina O. A. Application of the Fenton Oxidation Method for Cheese Production Wastewater Treatment	127
Mechanical Engineering. Metal Treatment	139
Mansur V., Pershin V. F. Apparatus for Preparing a Mixture from Components Prone to Segregation: Current Status and Prospects. Part II.....	139
Pyatykh A. S., Timofeev S. A., Ushakov V. A. Investigation of the Quality of the Threaded Surface of Pedicle Screws	153
New Professors, Doctors and Candidates of Sciences	162
Indexes to Volume 28, 2022	163
Contents of Volume 28, 2022	163
Author Index	169

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛИНИЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ И ХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ

С. А. Санников, В. Г. Мокрозуб, М. С. Калистратов

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

Ключевые слова: автоматизированное проектирование; линии для гальванической обработки деталей; процедурная модель; функциональная диаграмма.

Аннотация: Дано описание процедурной модели проектирования гальванических линий, которая включает в себя следующие стадии проектирования: определение типов, числа и размеров ванн на каждом этапе технологического процесса; компоновка аппаратов и трассировки трубопроводов; разработка конструкции отдельной ванны. Для каждой стадии определены входные, управляющие и выходные информационные потоки, включая обратные связи. Модель предназначена для создания интеллектуальных систем автоматизированного проектирования.

Введение

Линии для нанесения гальванических, химических и анодных покрытий используются для придания обрабатываемым изделиям защитных, декоративных, электропроводных и других свойств. Их особенность – огромное разнообразие технологических карт, рецептур для придания изделию тех или иных свойств. Обработка производится с применением однотипного оборудования, выстроенного в технологическую цепочку – линию, которая включает основное и вспомогательное оборудование, выпрямительные и фильтровальные установки, холодильные машины, запорную и регулирующую арматуру, трубопроводы.

В соответствии с ГОСТ 2.103–2013 основными этапами разработки конструкторской документации являются:

- разработка проектной конструкторской документации (техническое предложение, эскизный проект, технический проект);
- разработка рабочей конструкторской документации.

На каждом из этапов осуществляется детализация проекта.

Проектирование линии проходит две взаимосвязанные инженерно-технические стадии [1]:

- технологическую;
- конструкционную.

Цель технологического проектирования состоит в выборе (разработке) оптимальной технологической карты получения покрытий, удовлетворяющих требованиям технического задания, разработке оптимальной компоновки линии

(сокращение потерь, связанных с перемещением обслуживающего персонала или манипулятора), определении оптимальных технологических и конструкционных параметров технологических ванн и др. В качестве критерия оптимизации, как правило, используют капитальные и эксплуатационные затраты.

На стадии конструкционного проектирования решаются задачи оптимального размещения оборудования, выбора и разработки конструкции технологических ванн, разработки монтажно-технологической документации и пр.

Вопросам разработки систем автоматизированного проектирования (САПР) химико-технологических систем (ХТС), к которым можно отнести и гальванические линии, посвящено большое число публикаций. В статьях [2, 3] дано описание разработки САПР ХТС для химико-фармацевтической промышленности, в [4 – 7] рассмотрена автоматизация различных этапов проектирования многоассортиментных химических производств, в [8] дан подробный анализ состояния автоматизированного проектирования многоассортиментных химических производств. Авторы публикаций [9, 10] описывают подходы к проектированию оборудования отдельных стадий гальванических линий, в работах [11, 12] рассматриваются управление и оптимизация гальванических процессов.

Несмотря на достаточно большое число публикаций, посвященных автоматизации проектирования гальванических линий и смежных областей, в литературных источниках отсутствует описание процесса проектирования гальванических линий как системы, охватывающей стадии технологического и конструкционного проектирования.

Цель данного исследования – разработка процедурной модели проектирования линии для нанесения гальванического, химического и анодного покрытий, охватывающей стадии технологического и конструкционного проектирования.

Представлена функциональная диаграмма стадий технологического и конструкционного проектирования линии. При этом на стадии технологического проектирования решается задача определения технологической карты обработки деталей, типов ванн на каждом этапе (формирование структуры линии), числа и размеров технологических ванн, на стадии конструкционного проектирования – размещения ванн в линии (одно-, двухрядные линии) в производственном помещении, трассировки трубопроводов и конструирования отдельных единиц основного и вспомогательного оборудования. Рассмотрена процедурная модель проектирования линии.

Функциональная диаграмма проектирования линий для нанесения гальванических, химических и анодных покрытий

Для представления этапов процесса проектирования линий и информационных потоков, присутствующих при проектировании, воспользуемся методологией функционального моделирования и графической нотации IDEF0 (Integration Definition for Function Modeling).

Контекстная диаграмма верхнего уровня, отображающая связи процесса проектирования с окружающей средой, представлена на рис. 1.

Функция блока А0 – проектирование технологического объекта. Исходные данные для проектирования – техническое задание, включающее перечень обрабатываемых деталей, объемы и технологические карты (при наличии) обработки каждой детали и сборочной единицы (ДСЕ). Результат – элементы технического проекта, включающие тип и размеры каждой единицы оборудования линии (спецификации), компоновочные чертежи оборудования, чертежи трассировки трубопроводов, конструкторско-технологическую документацию на оборудование, которое предстоит изготовить. Механизмы – технологи-электрохимики, конструкторы, технологи машиностроения – «лица, принимающие решения» в вопросах выбора.

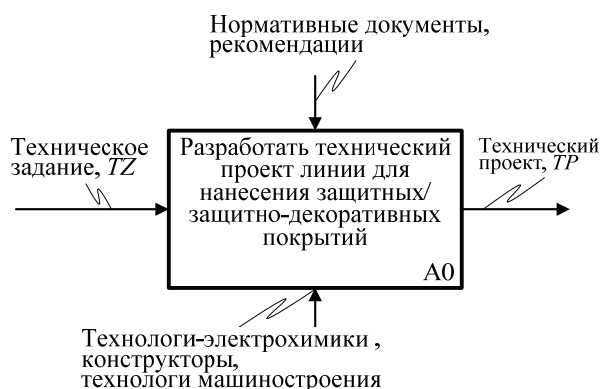


Рис. 1. Контекстная диаграмма верхнего уровня A0 проектирования гальванической линии

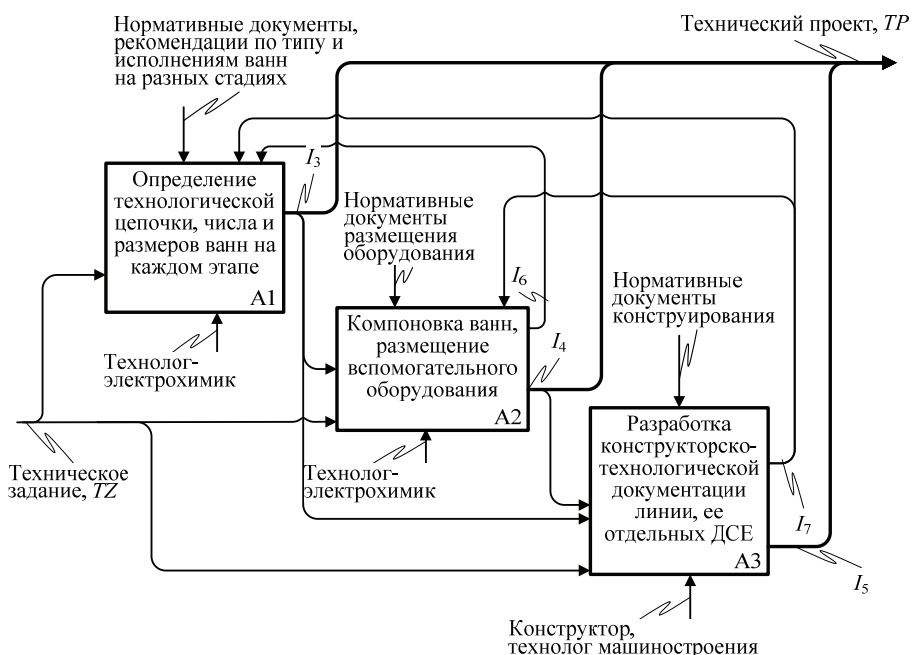


Рис. 2. A0 – разработка технического проекта линии для нанесения защитно-декоративных покрытий

На рисунке 2 представлена функциональная диаграмма A0 – разработка технического проекта линии для нанесения защитно-декоративных покрытий, где используются следующие информационные потоки:

TZ – техническое задание на проектирование, $TZ = I_1 \cup I_2$;

I_1 – перечень обрабатываемых ДСЕ, объемы их выпуска и время, за которое надо выпустить данные объемы;

I_2 – технологическая карта (последовательность операций обработки для каждого ДСЕ, состав и количество химических реагентов, добавок, их свойства, продолжительность каждой технологической операции и др.);

I_3 – размер единичной загрузки, используемый технологический спутник, тип, число и рабочее окно ванн на каждой стадии (спецификация основного и вспомогательного оборудования);

I_4 – координаты аппаратов в производственном помещении, координаты вспомогательного оборудования и соединительных трубопроводов (компоновочные чертежи и чертежи трасс);

I_5 – структура, размеры элементов и порядок изготовления ванн (спецификация, чертеж общего вида, чертежи деталей, маршрутно-операционные карты);

I_6 – перечень проблемных ванн для стадии размещения и трассировки, причины, по которым для этих аппаратов не удастся выполнить этап размещения и трассировки;

I_7 – перечень проблемных стадий для изготовления ванн с теми характеристиками, которые определены на предыдущих этапах.

TP – технический проект, $TP = I_3 \cup I_4 \cup I_5$.

Функциональная диаграмма A1 – определение технологической цепочки, числа и размеров ванн на каждом этапе, представлена на рис. 3, где I_{31} – типы ванн на каждом этапе; I_{32} – число и размеры ванн; I_{33} – проблемные стадии рабочего окна и числа ванн; $I_3 = I_{31} \cup I_{32}$.

Функциональная диаграмма A2 – размещение аппаратов и трассировка трубопроводов, представлена на рис. 4. Предполагается, что оборудование размещается в несколько рядов. В этом случае задача размещения оборудования может быть разбита на две подзадачи:

- размещение ванн по рядам;
- размещение ванн в ряду.

Информационные потоки:

I_{41} – перечень ванн, размещаемых в каждом ряду;

I_{42} – координаты ванн в каждом ряду;

I_{43} – координаты трубопроводов;

$I_4 = I_{42} \cup I_{43}$ – компоновочные чертежи и чертежи трасс.

I_{44} – проблемные ванны при размещении в заданном ряду;

I_{45} – проблемные ванны при трассировке трубопроводов.

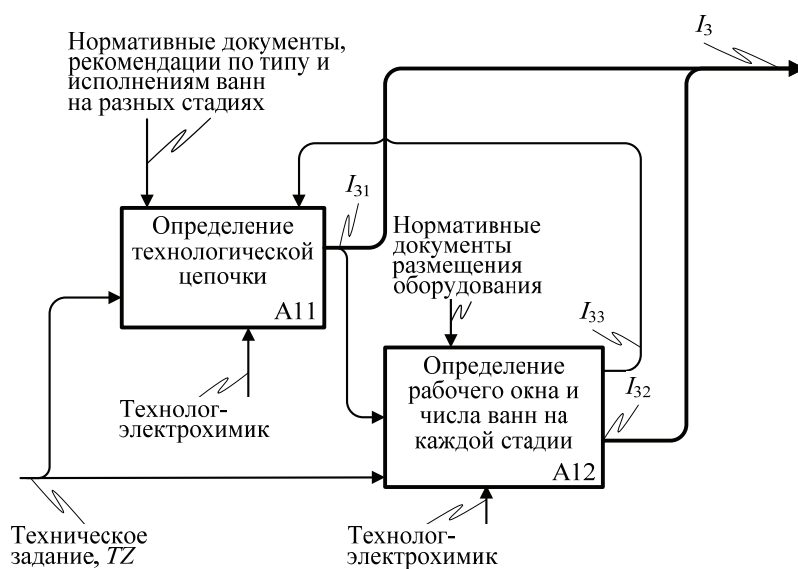


Рис. 3. A1 – Определение технологической цепочки, числа и размеров ванн на каждом этапе

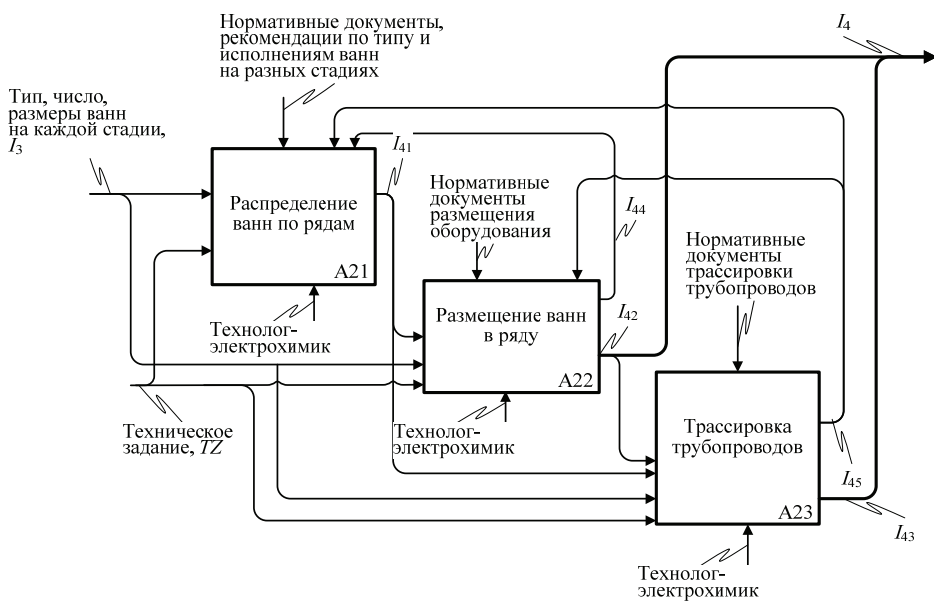


Рис. 4. А2 – Размещение аппаратов и трассировка трубопроводов

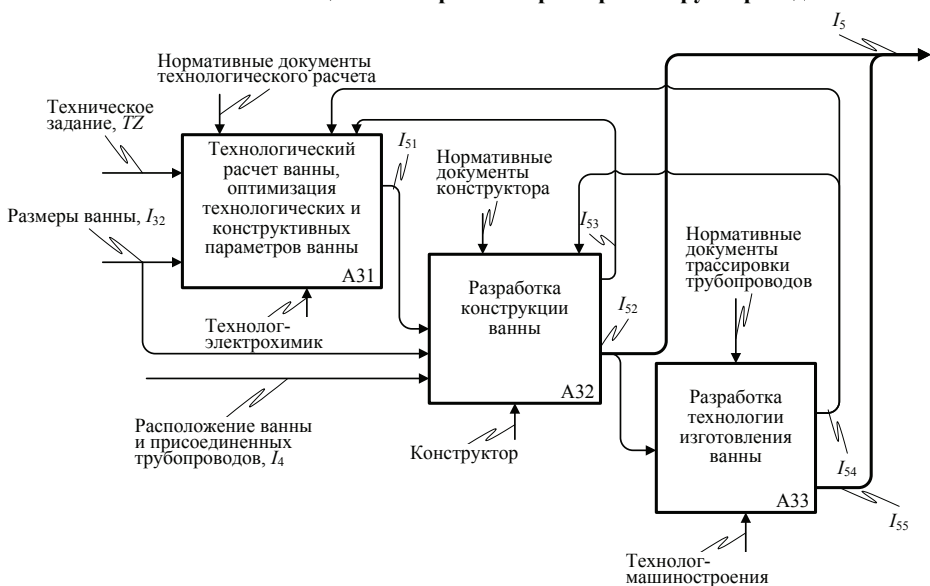


Рис. 5. А3 – Разработка конструкторско-технологической документации отдельных единиц оборудования

Функциональная диаграмма А3 – разработка конструкторско-технологической документации отдельных единиц оборудования, представлена на рис. 5.

Информационные потоки:

I_{51} – результаты технологического расчета и оптимизации технологических и конструктивных параметров аппарата;

I_{52} – конструкторская документация;

I_{53} – проблемные характеристики аппарата при конструировании;

I_{54} – проблемные стадии разработки технологии изготовления ванн;

I_{55} – технологическая документация;

$I_5 = I_{52} \cup I_{53}$ – технический проект аппарата (конструкторско-технологическая документация).

Процедурная модель проектирования линий, предназначенных для гальванической, химической и анодной обработки деталей

Процедурная модель FM предназначена для преобразования информационного потока, определенного техническим заданием TZ в информационный поток технического проекта TP с использованием информационной модели проектируемого объекта M :

$$FM : TZ \xrightarrow{M} TP ;$$

$$TZ = I_1 \cup I_2 ;$$

$$TP = I_3 \cup I_4 \cup I_5 .$$

Процедурную модель представим в виде системы выражений:

$$FM = \langle F_1, F_2, F_3 \rangle ;$$

$$M = \langle M_1, M_2, M_3 \rangle ;$$

$$F_1 : TZ \cup I_6 \cup I_7 \xrightarrow{M_1} I_3 ;$$

$$F_2 : TZ \cup I_3 \cup I_7 \xrightarrow{M_2} I_6 ;$$

$$F_3 : TZ \cup I_3 \cup I_4 \xrightarrow{M_3} I_5 \cup I_7 ,$$

где F_1, F_2, F_3 – процедуры соответственно определения технологической цепочки, числа и размеров ванн на каждой стадии; размещения ванн и трассировки трубопроводов; разработки конструкторско-технологической документации отдельных единиц оборудования; M_1, M_2, M_3 – информационные модели соответственно технологической цепочки, числа и размеров ванн на каждой стадии; размещения ванн и трассировки трубопроводов; отдельной ванны технологической цепочки;

$$F_1 = \langle F_{11}, F_{12} \rangle ;$$

$$M_1 = \langle M_{11}, M_{12} \rangle ;$$

$$F_{11} : TZ \cup I_{33} \xrightarrow{M_{11}} I_{31} ;$$

$$F_{12} : TZ \cup I_{31} \xrightarrow{M_{12}} I_{32} \cup I_{33} ,$$

где F_{11}, F_{12} – процедуры соответственно определения технологической цепочки; числа и размеров ванн на каждой стадии; M_{11}, M_{12} – информационные модели соответственно технологической цепочки и ванн на каждой стадии (позволяет определить число аппаратов и рабочее окно загрузки);

$$F_2 = \langle F_{21}, F_{22}, F_{23} \rangle ;$$

$$M_2 = \langle M_{21}, M_{22}, M_{23} \rangle ;$$

$$F_{21} : TZ \cup I_3 \cup I_{44} \cup I_{45} \xrightarrow{M_{21}} I_{41} ;$$

$$F_{22} : TZ \cup I_{41} \cup I_3 \cup I_{45} \xrightarrow{M_{22}} I_{42} \cup I_{44} ;$$

$$F_{23} : TZ \cup I_{41} \cup I_{42} \xrightarrow{M_{23}} I_{43} \cup I_{45} ,$$

где F_{21}, F_{22}, F_{23} – процедуры соответственно распределения ванн по рядам; размещения ванн в ряду; трассировки трубопроводов; M_{21}, M_{22}, M_{23} – информационные модели соответственно распределения ванн по рядам; размещения ванн в ряду; трассировки трубопроводов;

$$F_3 = \langle F_{31}, F_{32}, F_{33} \rangle ;$$

$$M_3 = \langle M_{31}, M_{32}, M_{33} \rangle ;$$

$$F_{31} : TZ \cup I_{32} \cup I_{53} \cup I_{54} \xrightarrow{M_{31}} I_{51} ;$$

$$F_{32} : TZ \cup I_{32} \cup I_4 \cup I_{51} \cup I_{54} \xrightarrow{M_{32}} I_{52} \cup I_{53} ;$$

$$F_{33} : I_{52} \xrightarrow{M_{33}} I_{55} \cup I_{54} ,$$

где F_{31}, F_{32}, F_{33} – процедуры соответственно технологического расчета ванны и оптимизации ее конструктивных и технологических параметров; разработки конструкции ванны; разработки технологии изготовления ванны; M_{31}, M_{32}, M_{33} – информационные модели соответственно технологического расчета ванны и оптимизации ее конструктивных и технологических параметров; конструкции ванны; технологии изготовления ванны.

В таблице 1 обобщены приведенные состав и функции процедурной модели.

Таблица 1

**Процедурная модель процесса проектирования линии
для гальванической, химической и анодной обработки деталей**

Процедура	Действие
1	2
$FM, FM = \langle F_1, F_2, F_3 \rangle$	$FM : TZ \xrightarrow{M} TP ,$ $M = \langle M_1, M_2, M_3 \rangle$
$F_1, F_1 = \langle F_{11}, F_{12} \rangle$	$F_1 : TZ \cup I_6 \cup I_7 \xrightarrow{M_1} I_3 ,$ $M_1 = \langle M_{11}, M_{12} \rangle$
F_{11}	$F_{11} : TZ \cup I_{33} \xrightarrow{M_{11}} I_{31}$
F_{12}	$F_{12} : TZ \cup I_{31} \xrightarrow{M_{12}} I_{32} \cup I_{33}$
$F_2, F_2 = \langle F_{21}, F_{22}, F_{23} \rangle$	$F_2 : TZ \cup I_3 \cup I_7 \xrightarrow{M_2} I_4 \cup I_6 ,$ $M_2 = \langle M_{21}, M_{22}, M_{23} \rangle$
F_{21}	$F_{21} : TZ \cup I_3 \cup I_{44} \cup I_{45} \xrightarrow{M_{21}} I_{41}$

1	2
F_{22}	$F_{22} : TZ \cup I_{41} \cup I_3 \cup I_{45} \xrightarrow{M_{22}} I_{42} \cup I_{44}$
F_{23}	$F_{23} : TZ \cup I_{41} \cup I_{42} \xrightarrow{M_{23}} I_{43} \cup I_{45}$
$F_3, F_3 = \langle F_{31}, F_{32}, F_{33} \rangle$	$F_3 : TZ \cup I_3 \cup I_4 \xrightarrow{M_3} I_5 \cup I_7,$ $M_3 = \langle M_{31}, M_{32}, M_{33} \rangle$
F_{31}	$F_{31} : TZ \cup I_{32} \cup I_{53} \cup I_{54} \xrightarrow{M_{31}} I_{51}$
F_{32}	$F_{32} : TZ \cup I_{32} \cup I_4 \cup I_{51} \cup I_{54} \xrightarrow{M_{32}} I_{52} \cup I_{53}$
F_{33}	$F_{33} : I_{52} \xrightarrow{M_{33}} I_{55} \cup I_{54}$

Заключение

Дано описание процедурной модели проектирования гальванических линий. Для каждой стадии определены входные, управляющие и выходные информационные потоки, включая обратные связи. Модель предназначена для разработки интеллектуальной системы автоматизированного проектирования, в которой последовательность этапов проектирования и необходимость возврата на предыдущие этапы определяется автоматически или с минимальным участием человека.

Дальнейшее развитие процедурной модели предполагает разработку информационных моделей каждой стадии проектирования, позволяющих преобразовать входной информационный поток стадии в выходной.

Список литературы

1. Кафаров, В. В. Проектирование и расчет оптимальных систем технологических трубопроводов / В. В. Кафаров, В. П. Мешалкин. – М. : Химия, 1991. – 368 с.
2. Автоматизированное создание технологических схем для химико-фармацевтической промышленности / А. В. Матасов, С. Э. Батин, А. И. Козлов, В. А. Мозгунов, Н. В. Меньшутина // Информационные ресурсы России. – 2010. – № 4. – С. 14 – 17.
3. Батин, С. Э. Алгоритм подбора оборудования для технологических схем производства твердых лекарственных препаратов / С. Э. Батин, А. В. Матасов // Успехи в химии и химической технологии. – 2010. – Т. 24, № 1 (106). – С. 8 – 10.
4. Карпушкин, С. В. Выбор основной аппаратуры для оснащения технологических систем многоассортиментных химических производств / С. В. Карпушкин, В. И. Зацепина, Е. П. Зацепин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2012. – Т. 18, № 3. – С. 552 – 557.
5. Borisenko, A. V. Hierarchy of Processing Equipment Configuration Design Problems for Multiproduct Chemical Plants / A. V. Borisenko, S. V. Karpushkin // Journal of Computer and Systems Sciences International. – May 2014. – Vol. 53, Is. 3. – P. 410 – 419. doi: 10.1134/S1064230714030046
6. Mokeddem, D. Optimal Solutions of Multiproduct Batch Chemical Process Using Multiobjective Genetic Algorithm with Expert Decision System / D. Mokeddem, A. Khellaf // Journal of Automated Methods and Management in Chemistry. – 2009. – Vol. 2009(1). – P. 927426. doi: 10.1155/2009/927426

7. Егоров, С. Я. Автоматизированный выбор, размещение и визуализация трубопроводной арматуры химических производств / С. Я. Егоров, С. Ю. Бойков, К. В. Немтинов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2011. – Т. 17, № 2. – С. 457 – 461.

8. Egorov, A. F. The Current State of Analysis, Synthesis, and Optimal Functioning of Multiproduct Digital Chemical Plants: Analytical Review / A. F. Egorov, T. V. Savitskaya, P. G. Mikhailova // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2021. – Vol. 55, No. 2. – P. 225 – 252. doi: 10.1134/S0040579521010061

9. Аносова, О. И. Проектирование гальванических линий с использованием информационных технологий / О. И. Аносова, К. В. Немтинов, А. А. Родина, В. А. Немтинов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – Т. 3, № 7-3 (18-3). – С. 310 – 313.

10. Разработка конструкции установки химического никелирования, функционирующей в составе гальванической линии / А. Б. Борисенко, В. В. Храпцов, В. А. Немтинов, А. В. Крылов, М. А. Матрохин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2021. – Т. 27, № 2. – С. 275 – 284. doi: 10.17277/vestnik.2021.02.pp.275-284

11. Пчелинцева, И. Ю. Система автоматизированного управления процессом нанесения гальванического покрытия в ванне с токонепроводящим экраном / И. Ю. Пчелинцева, Ю. В. Литовка // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2022. – Т. 23, № 4. – С. 188 – 196. doi : 10.17587/mau.23.188-196

12. Пчелинцева, И. Ю. Математическая модель и численная схема расчета электрических полей в гальванических ваннах с плоским токонепроводящим экраном // И. Ю. Пчелинцева, Ю. И. Литовка // Дифференциальные уравнения и процессы управления. – 2021. – № 3. – С. 85 – 97.

System Analysis of the Design Process of Lines for Electrochemical and Chemical Processing of Parts

S. A. Sannikov, V. G. Mokrozub, M. S. Kalistratov

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

Keywords: computer-aided design; lines for galvanic processing of parts; procedural model; functional diagram.

Abstract: The paper describes a procedural model for designing galvanic lines, which includes the following design stages: identification of the types, number and dimensions of baths at each stage of the technological process; arrangement of devices and piping routing; development of the design of a separate bath. For each stage, input, control and output information flows, including feedbacks, are defined. The model is designed to create intelligent computer-aided design systems.

References

1. Kafarov V.V., Meshalkin V.P. *Proyektirovaniye i raschet optimal'nykh sistem tekhnologicheskikh truboprovodov* [Design and calculation of optimal systems of technological pipelines], Moscow: Khimiya, 1991, 368 p. (In Russ.).

2. Matasov A.V., Batin S.E., Kozlov A.I., Mozgunov V.A., Men'shutina N.V. [Automated creation of technological schemes for the chemical and pharmaceutical industry], *Informatsionnyye resursy Rossii* [Information Resources of Russia], 2010, no. 4, pp. 14-17. (In Russ., abstract in Eng.).
3. Batin S.E., Matasov A.V. [Equipment selection algorithm for technological schemes for the production of solid drugs], *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Advances in chemistry and chemical technology], 2010, vol. 24, no. 1(106), pp. 8-10. (In Russ., abstract in Eng.).
4. Karpushkin S.V., Zatsepina V.I., Zatsepin Ye.P. [Choice of the main equipment for equipping technological systems of multi-assortment chemical productions], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 3, pp. 552-557. (In Russ., abstract in Eng.).
5. Borisenko A.B., Karpushkin S.V. Hierarchy of Processing Equipment Configuration Design Problems for Multiproduct Chemical Plants, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, May 2014, vol. 53, Is. 3, pp. 410-419. doi: 10.1134/S1064230714030046
6. Mokeddem D., Khellaf A. Optimal Solutions of Multiproduct Batch Chemical Process Using Multiobjective Genetic Algorithm with Expert Decision System, *Journal of Automated Methods and Management in Chemistry*, 2009, vol. 2009, art. ID 927426, 9 p. doi: 10.1155/2009/927426
7. Egorov S.Ya., Boikov S.Yu., Nemtinov K.V. [Automated selection, placement and visualization of pipeline fittings for chemical production], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2011, vol. 17, no. 2, pp. 457-461. (In Russ., abstract in Eng.).
8. Egorov A.F., Savitskaya T.V., Mikhailova P.G. The Current State of Analysis, Synthesis, and Optimal Functioning of Multiproduct Digital Chemical Plants: Analytical Review, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2021, vol. 55, no. 2, pp. 225-252. doi: 10.1134/S0040579521010061
9. Anosova O.I., Nemtinov K.V., Rodina A.A., Nemtinov V.A. Design of galvanic lines using information technologies, *Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice], 2015, vol. 3, no. 7-3 (18-3), pp. 310-313. (In Russ.).
10. Borisenko A.B., Khramtsov V.V., Nemtinov V.A., Krylov A.V., Matrokhin M.A. [Development of the design of a chemical nickel plating plant operating as part of a galvanizing line], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2021, vol. 27, no. 2, pp. 275-284. doi: 10.17277/vestnik.2021.02.pp.275-284 (In Russ., abstract in Eng.).
11. Pchelintseva I.Yu., Litovka Yu.V. [Automated control system for the process of electroplating in a bath with a non-conductive of electric current screen], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye* [Mechatronika, avtomatizatsiya, upravlenie], 2022, vol. 23, no. 4, pp. 188-196. doi:10.17587/mau.23.188-196 (In Russ., abstract in Eng.).
12. Pchelintseva I.Yu., Litovka Yu.V. [Mathematical model and numerical scheme for calculating electric fields in galvanic baths with a flat non-conductive screen], *Differentsial'nyye uravneniya i protsessy upravleniya* [Differential equations and control processes], 2021, no. 3, pp. 85-97. (In Russ., abstract in Eng.).

Systemanalyse des Linienentwurfsprozesses für die elektrochemische und chemische Bearbeitung von Teilen

Zusammenfassung: Es ist ein Verfahrensmodell für die Planung von Galvanikanlagen beschrieben, das folgende Planungsphasen umfasst: Bestimmung der Art, Anzahl und Abmessungen von Bädern in jeder Phase des technologischen

Prozesses; Geräteanordnung und Leitungsführung; Entwicklung des Designs eines einzelnen Bades. Für jede Stufe sind Eingangs-, Steuer- und Ausgangsinformationsflüsse einschließlich Rückmeldungen definiert. Das Modell ist entwickelt, um intelligente computergestützte Konstruktionssysteme zu erstellen.

Analyse systématique du processus de conception de lignes pour l'usinage électrochimique et chimique des pièces

Résumé: Est donnée la description du modèle procédural de la conception des lignes galvaniques, qui comprend les étapes de la conception suivantes: détermination du type, du nombre et de la taille des baignoires à chaque étape du processus technologique; disposition des appareils et du traçage des canalisations; élaboration de la conception d'un bain. Pour chaque étape sont définis les flux d'informations d'entrée, de contrôle et de sortie, y compris les retours. Est conçu le modèle pour créer des systèmes intelligents de la conception assistée par ordinateur.

Авторы: *Санников Сергей Анатольевич* – аспирант кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; *Мокрозуб Владимир Григорьевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; *Калистратов Максим Сергеевич* – магистрант; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

ENERGY-SAVING CONTROL OF THE HEATING PROCESS

S. V. Artemova¹, M. A. Kamenskaia²,
A. I. Ladynin¹, A. G. Shmeleva¹, Vu Tri Chien¹

Department of Informatics, MIREA – Russian Technological University (1), Moscow, Russia; department of Power engineering, Tambov State Technical University (2), art_mari@bk.ru, Tambov, Russia

Keywords: expert system; energy-saving synthesis program; heating dynamic mathematical model.

Abstract: A technique for synthesizing an optimal program for energy-saving control of the heating process using the developed expert system is considered. The analysis and synthesis of the control is based on the method of synthesizing variables, which involves the use of some synthesizing vector, the dimension of which is much less than the dimension of the initial data array of the energy-saving control problem, and which uniquely determines the type and parameters of the control function.

As an example, the paper presents a block diagram of the control of an object, which is a system consisting of a heating element and a metal vessel with water installed on it. For the given system, a model of heating dynamics and an energy-saving control program were obtained, making it possible to reduce power consumption. The implementation of the control program allows saving about 6 % of electricity costs.

1. Introduction

The intensive development of the optimal control theory is usually associated with the Pontryagin's maximum principle, dynamic programming and related studies. This theory serves as a methodological basis for solving various applied problems, related to optimal control, in which the state of the object under study at any fixed moment in time can be defined by a vector in a finite-dimensional space. When using these principles, methods and theories, researchers encountered a number of difficulties caused by the fact that for processes described by infinite-dimensional systems, it is not possible to find a sufficiently universal statement of the problem with complete and verifiable optimality conditions. Even when the specified conditions for the optimality of the problem to be solved were formulated, there were fundamental difficulties in their practical use in finding the optimal control and its approximations [1, 2].

Jumps in operation states during control processes are possible. These changes can possibly affect the initial data array elements of the control problem, such as object model parameters, control action boundaries or time. The control problem itself may also change due to additional restrictions introduction or minimized functional changes. Therefore, an important problem formulation is the correct choice of the control strategy, which is why in addition to the program and positional strategies, energy-saving control system should include such adjustable strategies. We consider the differences between adjustable control strategies and non-adjustable ones. With an

unadjusted program control strategy, energy-saving control program, calculated for the initial control time is stored for any changes in the operating states. With an adjustable program strategy, when the operation state event changes, the control program is recalculated. With an adjustable positional strategy, the control function is synthesized again whenever the operation states change.

2. Energy-saving control synthesis

To solve the problems of analysis and synthesis of optimal control of objects, the developed expert system “Energy-saving control of dynamic objects” was used, the block diagram of which is shown in Fig. 1.

The main features of the expert system are as follows:

- dynamics modes of control objects are described by differential equations less than third order;
- energy costs, fuel consumption, control time, etc. are considered as minimized functional, taking into account the integral restrictions on the energy limit or fuel supply;
- control of determining the energy-saving type and calculation parameters is implemented by the program or positional strategies;
- solving problems of identification of control object dynamics models in the form of differential equations with discontinuous right-hand side;
- control devices for microprocessor software development;
- design of algorithmic support for optimal energy-saving control systems to solve direct and inverse problems.

The mathematical basis for the expert system includes several fundamental principles and is as follows:

- analysis and synthesis of complex systems on configurations variety;
- automatic control theory;
- Pontryagin’s maximum principle;
- synthesizing devices method;
- interval analysis;
- objects’ modeling and identification methods;
- selecting methods of optimal solution.

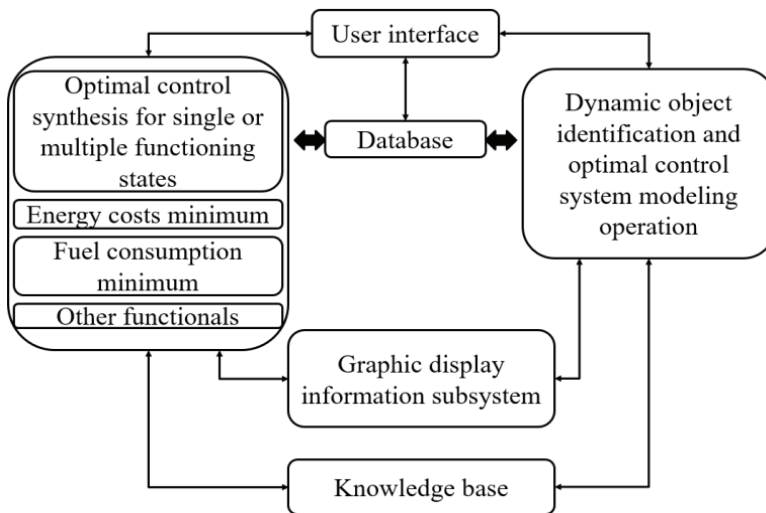


Fig. 1. A structural diagram of the energy-saving control expert system

The functioning of the expert system is based on the problem of optimal control using the technology of intellectualization of solution synthesis by representing the objects of the processes under study through an integrated graph, the vertices of which are at different abstraction levels. Each level is characterized by a number of features, variable laws and principles that describe the behavior of the system. For such a hierarchical description to be effective, models must be as independent as possible for different levels of the system. To distinguish this notion of hierarchy from others, the term “stratified system” is used for it. Abstraction levels that include a stratified description are called strata.

The main goal of solving the problem of intelligent synthesis is to obtain an optimal control that minimizes the given functional. The proposed technology is implemented as an AND-OR graph that meets the task of building algorithms for the synthesis of control of energy-intensive objects.

Search in the state space characterizes the solution of a particular problem as the process of finding the path state graph. In the state space, the vertices of the graph correspond to problem states and represent knowledge frames, the operation of which is implemented using algorithms of functional software modules, while the edges represent the transmitted and received information. The vertices of the graph are proposed to be located at different abstraction levels, making them belong to some strata. Each level represents a stage in the process of solving an algorithmic problem. The introduction of strata makes it possible to identify typical stages of intelligent control synthesis, as well as to optimize search algorithms on the graph, considering only alternative paths in the state space. The hierarchical model is shown in Fig. 2.

The upper layers are designed to identify information models of the analyzed objects and the process model of its technological equipment. The class stratum of optimal control problems characterizes problem-solving features. The modes and goals stratum is designed to determine the appropriate control functionality. Depending on the operating mode of the object, the control goal may change.

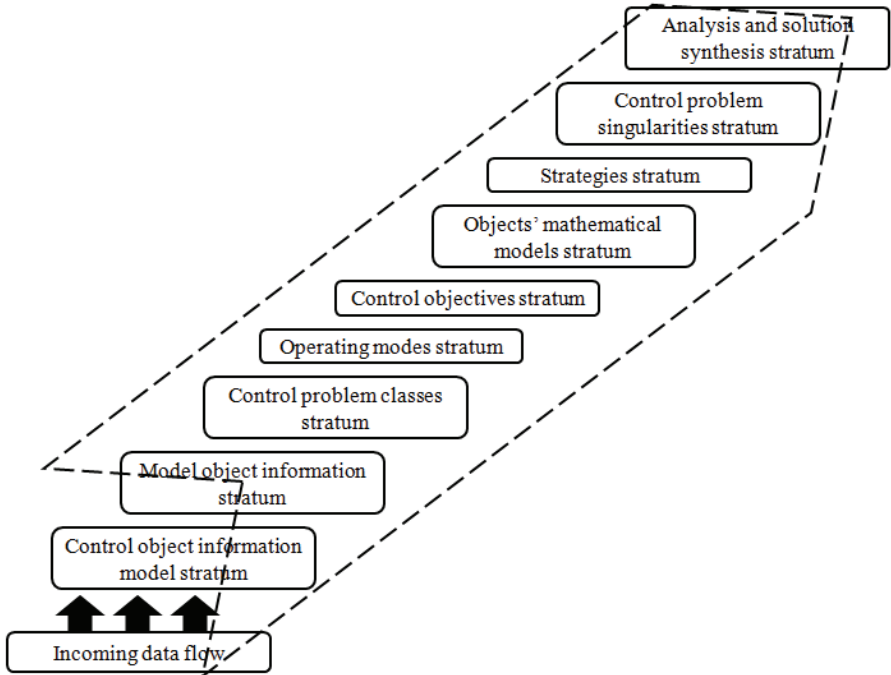


Fig. 2. Strata hierarchical model

The model stratum identifies the mathematical model of the object suitable for solving the control problem. Moreover, module identification procedures make it possible to choose the most adequate model of the control object based on the given experimental data.

The strategy stratum contains strategies for implementing optimal control. The feature stratum contains procedures that allow solving control problems taking into account: integral constraints, control of fixed and non-fixed time intervals as well as the phase coordinate trajectory of the ends of both object models with fixed or interval parameters, taking into account noise.

The analysis and synthesis stratum also contains several procedures: variable synthesis methods, Pontryagin's maximum principle, analytical synthesis of optimal controllers, dynamic programming and several others. The above technology makes it possible to synthesize solutions without decision maker participation.

The presented technology of intelligent synthesis of solutions makes it possible to develop optimal control strategies without the decision makers' participation [3].

3. Model definition

The statement of the energy control problem by systems with distributed parameters was given by A.Ya. Lerner and A.G. Butkovskij. They obtained results on solving a number of problems [2]. When managing such objects, the tasks of creating optimal control systems according to various criteria were solved. A minimized functional that depended on spatial variables, the state function, and control actions distributed in space were considered. In [4 – 6], various EMR set-ups were considered, where the functional of resource or energy costs was minimized:

$$J_e = \int_{t_0}^{t_k} u^2(t) dt, \quad (1)$$

where $u(t)$ is controlling action; t_0, t_k is initial and final value of the time interval.

The problem of optimal energy management can be set in the general form. We assume that \mathbf{A}, \mathbf{B} are model parameters matrices; z^0, z^k are the initial and final values of the control vector; u_{low}, u_{upp} are control action changes of the lower and upper bounds; n is the dimensionality of vector z .

We define the dynamic model of the object in the form of a system of linear differential equations

$$\dot{z} = \mathbf{A}z(t) + \mathbf{B}u(t), \quad t \in [t_0, t_k], \quad (2)$$

where by the conditions on the vector of phase coordinates and scalar control are of the form:

$$z(t_0) = z^0 = (z_1^0, z_2^0, \dots, z_n^0)^t, \quad z(t_k) = z^k = (z_1^k, z_2^k, \dots, z_n^k)^t, \quad (3)$$

$$\forall t \in [t_0, t_k]: \quad u(t) \in [u_{low}, u_{upp}]. \quad (4)$$

It is required to minimize the functional:

$$J = \int_{t_0}^{t_k} f_0(u(t)) dt. \quad (5)$$

It is also required to find such control $u^*(t)$, under which for conditions (2) – (4) functional (5) reaches a minimum on the source data given array:

$$R = (\mathbf{A}, \mathbf{B}, u_{\text{low}}, u_{\text{upp}}, z^0, z^k, t_0, t_k). \quad (6)$$

For the formulated task above, the function $f_0(u(t))$ defines the cost functional. While minimizing energy consumption, it has the form (1). The described problem (2) – (5) is an optimal control problem with condition on control action that given by a time interval and phase coordinates' vector trajectory fixed ends. Usually, the average temperature of the object under consideration is taken as the first component of the control vector of the thermal object, and temperature change rate, etc. is taken as the second coordinate. In case of electric heating, the voltage or current of networks is taken over as the control.

4. Energy management strategy

There are different strategies for energy management implementing in dynamic modes action control. There are two well-known strategies for optimal control implementation. The first one involves software, in which the optimal program problem is solved by the synthesis of an optimal control scheme:

$$u^*(\cdot) = (u^*(t), t \in [t_0, t_k]),$$

The second one is positional, where synthesizing function determines the control system feedback, i.e.:

$$u^*(t) = s(z(t), t_k - t).$$

The optimal control at each time period is calculated depending on the values of the vector coordinates for the current phase and remaining time.

To solve the problems of analysis and synthesis of optimal control of objects, a developed expert system is proposed, the main features of which are the following:

- dynamic modes of control objects are described by differential equations not higher than the third order;
- energy costs, fuel consumption, control time, etc. are considered as the minimized functionals, taking into account integral limitations on the energy limit or fuel reserve;
- determination of the type and calculation of the energy management parameters is implemented by program strategy or positional strategies;
- the problem of identification of control objects dynamics is solved in the differential equations form with a discontinuous right-hand side;
- software development for microprocessor control devices;
- algorithmic support for designing direct and inverse problems of optimal energy management.

In the designed expert system a mathematical apparatus is used. This apparatus allows determining the function type of optimal energy management and calculating its parameters, change trajectories of the phase coordinates, the energy-saving effect and evaluating the performance of the control algorithm when the initial data is changed by the control data array. To date, the originality of the developed methods and the created knowledge base of the expert system have been confirmed. Manufacturers of equipment for industrial process automation have no information about real-time energy management and control synthesis possibility in various operating states in their product catalogs.

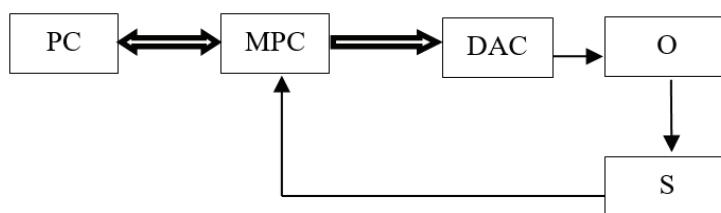


Fig. 3. Control flow chart for heating processes

The synthesis of the optimal program for energy management of the heating process using the proposed expert system was carried out according to the methodology that includes the following steps:

- obtaining experimental data on the dynamics of the heating process of the controlled object for the null CPT model;
- identification of the object model;
- synthesis of an optimal energy-saving program.

Testing of the described methodology was carried out as follows. The system consisting of an electric heating element with a metal vessel with water was used as a control object (O). The control was carried out according to calculated in the energy management PC program, and the microprocessor controller (MPC) performed the obtained program. The information about the object came from the sensors (S) of measured values through the MPC in the PC. Pairing the MPC and the object was carried out using a digital-to-analog adapter (DAC). The control flow chart is depicted in Fig. 3.

During the experiment, two values were measured: the temperature of the water was measured by a thermal sensor and the power consumption was measured by digital electric meter. The digital-to-analog adapter was a powerful thyristor multichannel key, providing contactless electric heater switching sections. The adapter had an input digital register with the possibility of external or internal input data synchronization. The design provided heating of the elements connection with a capacity of up to 3 kW, and also provided for the power stepwise switching possibility with a maximum number of switched channels not exceeding 8.

5. Solving the problem of minimizing electricity costs

According to the method, at the first stage, a heating thermogram was experimentally obtained, at the second stage, the heating model control problem was solved. The heating model type was determined and its parameters were calculated. From the non-optimal heating graph (Fig. 2), it can be seen that the object has a delay in the control channel $\tau = 1$ min. With this in mind, identification of the model dynamics was carried out in a time interval $t \in [1; 10]$. A sufficiently accurate model was proposed in the differential equations form with a discontinuous right-hand side consisting of two zones. The maximum absolute error of which was $E_{\max} = 0.4$ °C.

The first zone of the model $z \in [12.5; 32)$ is described by a real dual integrator:

$$\begin{bmatrix} \dot{} \\ z_1 \\ \dot{} \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.48 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.86 \end{bmatrix} u(t).$$

The second zone $z \in [32; 100]$ is described by a first-order inertial object or an aperiodic link:

$$\dot{z} = -0.002z(t) + 1.423u(t).$$

At the final stage, using the designed expert system, an optimal control synthesis was performed, and the function obtained in this case has the following form:

$$u^*(t) = \begin{cases} 7.5 & t \in [0; 1), \\ 3.82 - 0.13e^{0.48(t-1)} & t \in [1; 6), \\ 3.75 - 0.20e^{0.002(t-6)} & t \in [6; 19.5]. \end{cases}$$

The strategy of the energy-management program was implemented according to the function shown in Fig. 4.

Theoretical calculation results and the experimental function visualization are shown in Figs. 4, 5.

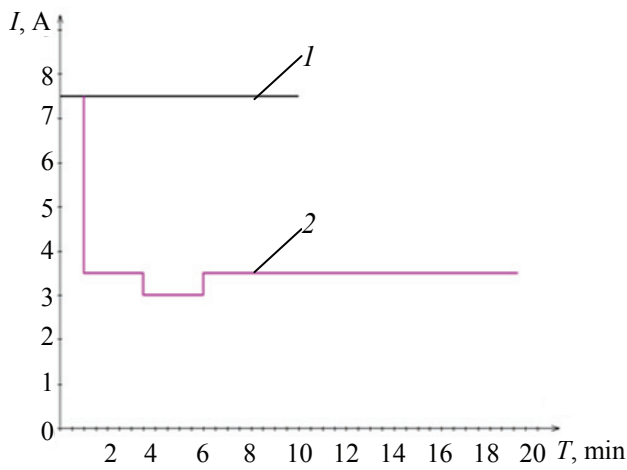


Fig. 4. Heating functions:
1 – non-optimal heating; 2 – optimal heating

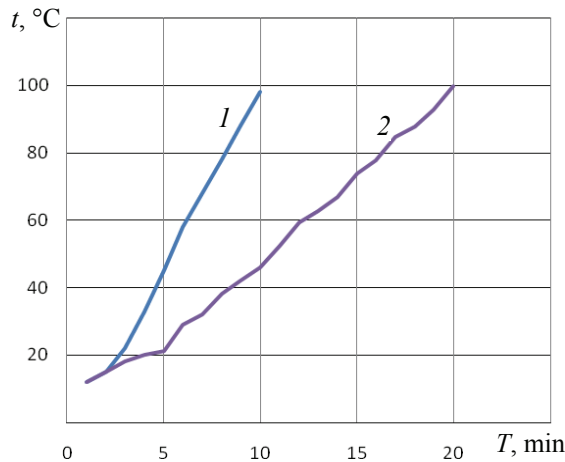


Fig. 5. Heating functions visualization and optimized heating functions implementation:
1 – visualization of the experimental data of the heating function;
2 – the experimental data for the optimized heating function

6. Conclusion

Having embodied the obtained energy management function for this system and comparing experiment and analytical calculation results, we can conclude that the maximum absolute error of the experimental thermogram was $E_{\max} = 2$ °C. Comparing the energy consumption at non-optimal (0.245 kWh) and energy-saving (0.230 kWh) heating, we obtained an energy saving about 6 %. It is possible to apply the proposed method of the energy management synthesis, both for household appliances with electric heating (ovens, teapots, coffee pots, boilers, etc.), and for industrial energy-intensive objects (furnaces, extruders, presses, etc.).

References

1. Artemova S.V., Artemov A.A., Kamenskaya M.A. [Visualization of the analysis of energy-saving control of an inertial object of the first order], *Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki* [Natural and technical sciences], 2018, no. 11(125), pp. 366-369. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Rokachevskii O.A., Sleptsov V.V., Ablaeva A.E., Kanaev S.A., Moskalenko O.V. Metrological Assurance of the Characteristics of Electric Drives at the Design Stage. *Journal of Physics: Conference Series: II International Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT II-2021)*. St. Petersburg, 3-6 March 2021. Krasnoyarsk, 2021, vol. 1889, pp. 042057. doi: 10.1088/1742-6596/1889/4/042057
3. Butkovskiy A.G., Lerner A.Ya. [About optimal control of systems with distributed parameters], *Doklady AN SSSR* [Report of the Academy of Sciences of the USSR], 1960, vol. 134, no. 4, pp. 778-781. (In Russ.)
4. Artemova S.V., Artemov A.A., Kamenskaya M.A. *Metodologiya proyektirovaniya intellektual'noy informatsionno-upravlyayushchey sistemy teplotekhnologicheskimi apparatami: monografiya* [Methodology of designing an intelligent information management system of heat-technological devices], Tambov, Publ TSTU, 2017. 196 p. (In Russ.)
5. Artemova S.V., Artemov A.A. [Energy management of industrial processes (by the example of installations annealing of magnetic circuits)], *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [Reporter of the National Research Tomsk State University, TSU], 2012, vol. 17, no. 5, pp. 1375-1379. available at: <http://journals.tsutmb.ru/a8/upload/2018-december/temp.93bd89a87e3874b21c558c2ee8642320.pdf> (accessed 02 March 2023). (In Russ.)
6. Artemova S.V. *Informatsionnaya sistema optimal'nogo upravleniya teplotekhnologicheskimi apparatami: monografiya* [Information system for optimal control of heat-technological devices], Moscow, St. Petersburg; Vienna; Hamburg, Publ. MINC [IINC], 2011, 234 p. (In Russ.)

Энергосберегающее управление процессами нагрева

С. В. Артемова¹, М. А. Каменская²,
А. И. Ладынин¹, А. Г. Шмелева¹, Ву Чи Чен¹

Кафедра «Информатика», ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (1), Москва, Россия; кафедра «Электроэнергетика», ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» (2), art_mari@bk.ru, Тамбов, Россия

Ключевые слова: математическая модель динамики нагрева; синтез программы энергосберегающего управления; экспертная система.

Аннотация: Рассмотрена методика синтеза оптимальной программы энергосберегающего управления процессом нагрева с использованием разработанной экспертной системы. В основе анализа и синтеза управления лежит метод синтезирующих переменных, предполагающий использование некоторого синтезирующего вектора, размерность которого значительно меньше размерности массива исходных данных задачи энергосберегающего управления и который однозначно определяет вид и параметры функции управления.

В качестве примера приведена структурная схема управления объектом, представляющим собой систему, состоящую из нагревательного элемента и установленного на нем металлического сосуда с водой. Для приведенной системы получена модель динамики нагрева и программа энергосберегающего управления, позволяющая снизить расход электроэнергии. Реализация программы управления позволяет экономить около 6 % затрат электроэнергии.

Список литературы

1. Артемова, С. В. Визуализация анализа энергосберегающего управления инерционным объектом первого порядка / С. В. Артемова, А. А. Артемов, М. А. Каменская // Естественные и технические науки. – 2018. – № 11(125). – С. 366 – 369.
2. Metrological Assurance of the Characteristics of Electric Drives at the Design Stage / О. А. Rokachevskii [et al.] // Journal of Physics: Conference Series: II International Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT II-2021). – St. Petersburg, 3 – 6 March 2021. – Krasnoyarsk, 2021. – Vol. 1889. – P. 042057. doi: 10.1088/1742-6596/1889/4/042057
3. Бутковский, А. Г. Об оптимальном управлении системами с распределенными параметрами / А. Г. Бутковский, А. Я. Лернер // Докл. АН СССР. – 1960. – Т. 134, № 4. – С. 778 – 781.
4. Артемова, С. В. Методология проектирования интеллектуальной информационно-управляющей системы теплотехнологическими аппаратами : монография / С. В. Артемова, А. А. Артемов, М. А. Каменская. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2017. – 196 с.
5. Артемова, С. В. Энергосберегающее управление технологическими процессами нагрева (на примере установки отжига магнитопроводов). – Текст электрон. / С. В. Артемова, А. А. Артемов // Вестник Томск. гос. ун-та. – 2012. – Т. 17, вып. 5. – С. 1375 – 1379. – URL :<http://journals.tsutmb.ru/a8/upload/2018-december/temp.93bd89a87e3874b21c558c2ee8642320.pdf> (дата обращения : 02.03.2023.)
6. Артемова, С. В. Информационная система оптимального управления теплотехнологическими аппаратами: монография / С. В. Артемова. – М. ; СПб. ; Вена ; Гамбург : Изд-во МИНЦ, 2011. – 234 с.

Energiesparende Steuerung des Heizprozesses

Zusammenfassung: Es ist eine Methode zur Synthese des optimalen Programms zur energiesparenden Steuerung des Erwärmungsprozesses unter Verwendung des entwickelten Expertensystems betrachtet. Die Analyse und Synthese der Steuerung basiert auf dem Verfahren zum Synthetisieren von Variablen, das die Verwendung eines Synthesevektors beinhaltet, dessen Dimension viel kleiner als die Dimension des anfänglichen Datenarrays des Energiesparsteuerungsproblems ist und der eindeutig Art und Parameter der Steuerfunktion bestimmt.

Als Beispiel ist das Blockdiagramm der Steuerung eines Objekts angegeben, bei dem es sich um ein System handelt, das aus einem Heizelement und einem darauf installiertem Metallgefäß mit Wasser besteht. Für das gegebene System sind ein Modell der Heizdynamik und ein Energiespar-Steuerungsprogramm erstellt, das es ermöglicht, den Stromverbrauch zu reduzieren. Die Implementierung des Steuerungsprogramms ermöglicht eine Einsparung von etwa 6 % der Stromkosten.

Gestion économe en énergie des processus de chauffage

Résumé: Est examinée la méthode de la synthèse du programme optimal de la gestion économisant de l'énergie du processus de chauffage à l'aide d'un système expert élaboré. A la base de l'analyse et de la synthèse de la gestion est la méthode des variables de la synthèse impliquant l'utilisation d'un vecteur de synthèse dont la dimension est beaucoup plus petite que la dimension de l'ensemble de données de base du problème de la gestion économisant de l'énergie, et qui détermine de manière unique le type et les paramètres de la fonction de la gestion.

À titre d'exemple, est donné un schéma structurel de la gestion d'un objet, qui est un système constitué d'un élément chauffant et d'un récipient d'eau métallique monté dessus. Pour le système ci-dessus, est cité un modèle de la dynamique du chauffage et un programme gestion économisant de l'énergie, ce qui permet de réduire la consommation de l'énergie. La mise en œuvre du programme de gestion permet d'économiser environ 6% des coûts d'électricité.

Авторы: *Артемова Светлана Валерьевна* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Информатика», институт комплексной безопасности и специального приборостроения, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», Москва, Россия; *Каменская Мария Анатольевна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия; *Ладынин Андрей Иванович* – доцент кафедры «Информатика»; *Шмелева Анна Геннадьевна* – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой «Информатика»; *Ву Чи Чуен* – аспирант кафедры «Информатика»; институт комплексной безопасности и специального приборостроения, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», Москва, Россия.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АНОМАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ РАДИОСИГНАЛОВ СПУТНИКОВОЙ РАДИОНАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМОЙ МЕТОДОМ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НЕВЯЗОК ИЗМЕРЕНИЙ

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

*Кафедра «Радиотехника»,
resbn@mail.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: аномальные измерения; определение координат; оптимальные алгоритмы обработки информации; подвижный наземный объект; спутниковая радионавигационная система.

Аннотация: Методами марковской теории оптимального оценивания случайных процессов синтезированы оптимальные комплексные алгоритмы обработки информации в навигационных комплексах подвижных наземных объектов на основе спутниковых радионавигационных систем. Для выявления аномальных измерений радиосигналов спутниковой радионавигационной системы проведено определение закона распределения невязок измерений методом статистической обработки. Выполнено компьютерное моделирование разработанных алгоритмов.

Введение

Основу современных навигационных комплексов подвижных объектов, в том числе и наземных, составляет аппаратура приема (АП) радиосигналов спутниковых радионавигационных систем (СРНС) типа NAVSTAR GPS, ГЛОНАСС, Галилео (Galileo) и др. Состав других датчиков и устройств, входящих в навигационный комплекс, разнообразен и выбирается из условия обеспечения точного и надежного определения координат и параметров движения подвижного объекта на основе комплексной обработки информации, а также обеспечения работы в нескольких режимах [1]. Например, для подвижного наземного объекта совместно с АП СРНС в состав навигационного комплекса могут входить: курсовая система магнитного типа и путевая система одометрического типа («Азимут»); инерциальная навигационная система на основе микроэлектромеханических акселерометров и гироскопов, а также барометрический высотомер («КомпНав-3»); инерциальная навигационная система на основе кварцевых акселерометров и волоконно-оптических гироскопов, а также одометра («БИНС-Тек»); датчики угловой ориентации (геомагнитный и гироскопический), датчик скорости и приемник систем дальней навигации «Чайка» и LORAN-C (США) («Ориентир»); инерциальная навигационная система на основе волоконно-оптических гироскопов и кремниевых акселерометров, доплеровского датчика скорости («ГАЛС-Д2М-4»).

Аппаратура приема радиосигналов СРНС позволяет обеспечивать высокую точность определения координат местоположения подвижного объекта и параметров его движения путем коррекции вычисленных координат местоположения объекта. Однако ее применение в составе навигационного комплекса имеет существенный недостаток – наличие аномальных измерений на выходе АП СРНС.

Причина аномальных измерений связана с видом радиосигналов, используемых в СРНС, а также влиянием на них канала распространения. Для повышения помехозащищенности и разрешающей способности в СРНС используются шумоподобные сигналы, которые формируются при помощи фазовой манипуляции сигналов высокостабильной несущей частоты псевдошумовыми последовательностями с заданными законами формирования. Для шумоподобных сигналов характерен случай малых отношений сигнал/шум на входе приемного устройства. При работе АП СРНС в режиме слежения в дискриминационном устройстве при малых отношениях сигнал/шум в пределах линейного или близкого к линейному участку дискриминационной характеристики возможен захват шумовых выбросов радиосигнала, что и приводит к появлению аномальных измерений. При этом закон распределения захвата шумовых выбросов, а следовательно и формирования аномальных распределений, является равномерным [2].

В современных навигационных комплексах для получения оценок координат и параметров движения подвижных объектов применяют марковские методы оптимального оценивания [3 – 7]. Для выявления аномальных измерений при использовании данных методов широкое распространение получил метод анализа вектора обновляемой последовательности (вектора невязок измерений) [8]. Применение данного метода позволяет создать адаптивные алгоритмы обработки информации в навигационных комплексах и тем самым снизить влияние аномальных измерений СРНС на точность определения координат и параметров движения подвижного объекта. Существенным недостатком данного метода применительно к АП СРНС является невозможность определения медленных искусственно созданных изменений псевдодальности в радиосигнале от навигационного космического аппарата.

Цель работы – выявление аномальных измерений на выходе АП СРНС путем определения методами математической статистики закона распределения вектора обновляемой последовательности (вектора невязок измерений), формируемого по измерениям СРНС.

Постановка задачи

Рассмотрим применение методов математической статистики для определения закона распределения вектора обновляемой последовательности (вектора невязок измерений) в алгоритмах оценивания координат местоположения и скорости подвижного объекта в вертикальной плоскости (вертикальный канал).

Полагаем, что в состав навигационного комплекса подвижного объекта входят: инерциальная навигационная система; M -канальная аппаратура приема радиосигналов СРНС и барометрический высотомер (**БВ**). Определять координату местоположения и параметры движения объекта в вертикальной плоскости (вертикальный канал) будем в нормальной земной системе координат $OX_g Y_g Z_g$, начало которой удалено от центра Земли на величину R_0 и в которой положение объекта определяется координатами x, y, z . Полагаем, что оси направлены: OX_g – на Север, OY_g – Восток, OZ_g – вверх по местной вертикали. В начальный момент времени t_0 объект имеет координаты x_0, y_0, z_0 .

Инерциальная навигационная система (**ИНС**) представляет собой стабилизируемую в горизонтальной плоскости свободную в азимуте платформу. Начало инерциальной системы координат $OX_{и} Y_{и} Z_{и}$ совпадает с центром масс объекта. Начальная выставка осуществлена, оси направлены соответственно: $OX_{и}$ – на Север, $OY_{и}$ – Восток, $OZ_{и}$ – вверх по местной вертикали. Выходные сигналы

ИНС дискретизированы по времени. С учетом вышесказанного, сигнал на выходе ИНС в вертикальной плоскости по оси $OZ_{\text{и}}$ можно записать в виде [9]

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

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

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

Измерение относительной высоты при помощи БВ осуществляется относительно уровня, соответствующего известному радиус-вектору R_0 геоцентрической (сферической) системы координат, систематическая ошибка учтена при выставке БВ, сигнал на выходе БВ $H_{\text{отн}}^{\text{БВ}}(t_{k+1})$ дискретизирован по времени и имеет вид [5]

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

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

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

$$u_{\text{БВ}}(t_{k+1}) = \phi_{\text{ии}}(t_{k+1}, t_k) u_{\text{БВ}}(t_k) + \gamma_{\text{и}}(t_{k+1}, t_k) n_{\text{и}}(t_k);$$

$$u_{\text{БВ}}(t_0) = u_{\text{БВ}0}, \quad (4)$$

в которых

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

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

Аппаратура приема сигналов СРНС обеспечивает прием радиосигналов СРНС ГЛОНАСС. Считаем, что преобразование выходных данных о местоположении объекта из системы координат ПЗ-90, в которой работает СРНС ГЛОНАСС, в нормальную земную систему координат выполнено. В данном случае измеренное значение высоты объекта относительно центра Земли $H^{\text{СРНС}}(t_{k+1})$ на выходе аппаратуры приема в дискретные моменты времени t_{k+1} , $k = 0, 1, 2, \dots$, аналогично [10] представим в виде

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

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

Представление «полезного» сигнала на выходе аппаратуры приема сигналов СРНС в вертикальной плоскости, выражение (6) через радиус-вектор R_0 позволяют определить относительную высоту $H_{\text{отн}}(t_k)$ по выходным данным СРНС.

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

$$\begin{aligned} \frac{dH_{\text{отн}}(t)}{dt} &= V_Z(t); \\ \frac{dV_Z(t)}{dt} &= a_Z(t). \end{aligned} \quad (7)$$

Дальнейшее задание модели требует задания модели изменения во времени ускорения объекта в вертикальной плоскости. Данная задача является довольно сложной, так как зависит от типа объекта, вида совершаемого им движения и может быть решена только для отдельных случаев движения объекта, например движения объекта с постоянным ускорением. Поэтому для задания модели изменения положения объекта в вертикальной плоскости применим принцип распределения информации между векторами наблюдения и управления [5]. Согласно этому принципу, значение составляющей ускорения объекта $a_Z(t)$ в математической модели (7) заменим на измеренное ИНС, то есть выходной сигнал ИНС $a_Z^{\text{ИНС}}(t_k)$ используем в качестве компоненты вектора управления. В результате для дискретных моментов времени получим:

$$H_{\text{отн}}(t_{k+1}) = H_{\text{отн}}(t_k) + TV_Z(t_k) + \frac{T^2}{2} \left(a_Z^{\text{ИНС}}(t_k) - \Delta_{aZ}(t_k) - g - \sigma \left(\frac{2T}{\alpha_a} \right)^{0,5} n_{aZ}(t_k) \right); \quad (8)$$

$$V_Z(t_{k+1}) = V_Z(t_k) + T \left(a_Z^{\text{ИНС}}(t_k) - \Delta_{aZ}(t_k) - g - \sigma \left(\frac{2T}{\alpha_a} \right)^{0,5} n_{aZ}(t_k) \right). \quad (9)$$

Подлежащий оцениванию вектор состояния в вертикальной плоскости, характеризующий положение объекта и скорость изменения этого положения во времени, включает четыре компоненты

$$\mathbf{X}_B(t_k) = [H_{\text{отн}}(t_k), V_Z(t_k), \Delta H(t_k), \Delta_{aZ}(t_k)]^T$$

и в соответствии с (2), (4), (8), (9) описывается разностным векторно-матричным стохастическим уравнением

$$\mathbf{X}_B(t_{k+1}) = \Phi_{xxB}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{X}_B(t_k) + \Psi_B(t_{k+1}, t_k) \mathbf{W}_B(t_k) + \Gamma_{xB}(t_{k+1}, t_k) N_{xB}(t_k), \quad (10)$$

где $\mathbf{W}_B = [a_Z^{\text{ИНС}}, g]^T$ – известный вектор управления; $N_{xB}(t_k) = n_{aZ}(t_k)$ – формирующие стандартные гауссовские случайные величины; Φ_{xxB} – фундаментальная матрица размером (4×4) с ненулевыми элементами $\Phi_{xxB_{11}} = \Phi_{xxB_{22}} =$

$= \Phi_{xxB_{33}} = \Phi_{xxB_{44}} = 1$, $\Phi_{xxB_{12}} = T$, $\Phi_{xxB_{14}} = -0,5T^2$, $\Phi_{xxB_{24}} = -T$; Ψ_B – переходная матрица управления размером (4×2) с ненулевыми элементами $\Psi_{B_{11}} = 0,5T^2$, $\Psi_{B_{12}} = -0,5T^2$, $\Psi_{B_{21}} = T$, $\Psi_{B_{22}} = -T$; Γ_{xB} – переходной вектор возмущения размером (4×1) с ненулевыми элементами $\gamma_{xB_{11}} = -0,5T^2 \sigma_a \left(\frac{2T}{\alpha_a} \right)^{0,5}$, $\gamma_{xB_{21}} = -T \sigma_a \left(\frac{2T}{\alpha_a} \right)^{0,5}$.

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

$$\begin{aligned}
 \xi_1(t_{k+1}) &= \mathbf{H}_1(t_{k+1})\mathbf{X}_B(t_{k+1}) + u_{\text{БВ}}(t_{k+1}); \\
 \xi_2(t_{k+1}) &= \mathbf{H}_2(t_{k+1})\mathbf{X}_B(t_{k+1}) + V_2 + \Gamma_2(t_{k+1})N_2(t_{k+1}),
 \end{aligned} \tag{11}$$

где \mathbf{H}_1 и \mathbf{H}_2 – векторы наблюдения размером (1×4) с ненулевыми элементами $h_{111} = h_{113} = 1$, $h_{211} = 1$; $V_2 = R_0$ – известная величина; $\Gamma_2 = \sigma_z$; $N_2(t_{k+1}) = n_z(t_{k+1})$ – шум наблюдения.

Комплексные оптимальные алгоритмы обработки информации в навигационных комплексах подвижных наземных объектов

Для получения алгоритмов комплексной оптимальной обработки информации в навигационных системах используем методы марковской теории оптимального оценивания.

Для вертикального канала, когда наблюдения описываются уравнением (11), а модель изменения вектора состояния – уравнением (10), оптимальная оценка определяется выражением [3 – 5, 10]

$$\begin{aligned}
 \mathbf{X}_B^*(t_{k+1}) &= \Phi_{xxB}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{X}_B^*(t_k) + \Psi_B(t_{k+1}, t_k)\mathbf{W}_B(t_k) + \mathbf{K}_1(t_{k+1}) \times \\
 &\times [\xi_1(t_{k+1}) - \Phi_{\text{ин}}(t_{k+1}, t_k)\xi_1(t_k) - \mathbf{H}_1(t_{k+1})\Psi_B(t_{k+1}, t_k)\mathbf{W}_B(t_k) + \\
 &+ \Phi_{\text{ин}}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{H}_1(t_k)\mathbf{X}_B^*(t_k) - \mathbf{H}_1(t_{k+1})\Phi_{xxB}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{X}_B^*(t_k)] + \mathbf{K}_2(t_{k+1}) \times \\
 &\times [\xi_2(t_{k+1}) - \mathbf{H}_2(t_{k+1})\Psi_B(t_{k+1}, t_k)\mathbf{W}_B(t_k) - V_2 - \mathbf{H}_2(t_{k+1})\Phi_{xxB}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{X}_B^*(t_k)], \tag{12}
 \end{aligned}$$

где $\mathbf{K}_1(t_{k+1})$ и $\mathbf{K}_2(t_{k+1})$ – векторы-столбцы размером (4×1) матрицы оптимальных коэффициентов передачи $\mathbf{K}(t_{k+1}) = [\mathbf{K}_1(t_{k+1}); \mathbf{K}_2(t_{k+1})]$, определяемые соотношениями:

$$\mathbf{K}(t_{k+1}) = \left[\Phi_{xxB}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{P}_B(t_k) \Phi_{yx}^T(t_{k+1}, t_k) + \mathbf{B}_{xy} \right] \times \\ \times \left[\mathbf{B}_{yy}^{-1} + \Phi_{yx}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{P}_B(t_k) \Phi_{yx}^T(t_{k+1}, t_k) \right]^{-1}; \quad (13)$$

$$\mathbf{P}_B(t_{k+1}) = \left[\Phi_{xxB}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{P}_B(t_k) \Phi_{xxB}^T(t_{k+1}, t_k) - \mathbf{K}(t_{k+1}) \right] \times \\ \times \left[\mathbf{B}_{xy} + \Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{P}_B(t_k) \Phi_{yx}^T(t_{k+1}, t_k) \right]^T,$$

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

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

$$\mathbf{B}_{xy} = \left[\Gamma_{xB}(t_{k+1}, t_k) \Gamma_{xB}^T(t_{k+1}, t_k) \mathbf{H}_1^T(t_{k+1}) \mid \Gamma_{xB}(t_{k+1}, t_k) \Gamma_{xB}^T(t_{k+1}, t_k) \mathbf{H}_2^T(t_{k+1}) \right];$$

$$\mathbf{B}_{yy} = \left[\begin{array}{c|c} A & C \\ \hline B & D \end{array} \right];$$

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

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

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

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

В выражение (12) для оптимальной оценки вектора состояния входит обновляемая последовательность или невязка измерений по измерениям СРНС, имеющая вид

$$\varepsilon_{B2}(t_{k+1}) = \xi_2(t_{k+1}) - \mathbf{H}_2(t_{k+1}) \Psi_B(t_{k+1}, t_k) \mathbf{W}_B(t_k) - V_2 - \\ - \mathbf{H}_2(t_{k+1}) \Phi_{xxB}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{X}_B^*(t_k). \quad (14)$$

В стационарном режиме работы обновляемая последовательность представляет собой белый гауссовский шум с нулевым математическим ожиданием и дисперсией

$$\sigma_\varepsilon^2(t_{k+1}) = M \left[\varepsilon_{B2}^2(t_{k+1}) \right] = \\ = \mathbf{H}_2(t_{k+1}) \Phi_{xxB}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{P}_B(t_k) \Phi_{xxB}^T(t_{k+1}, t_k) \mathbf{H}_2^T(t_{k+1}) + \Gamma_2^2(t_{k+1}). \quad (15)$$

Естественно предположить, что если закон распределения обновляемой последовательности не является гауссовским, то измерения на выходе АП СРНС – аномальные. Для проверки закона распределения используем методы математической статистики [11]. В соответствии с данными методами на временном интервале длительностью $\Delta T = N(t_{k+1} - t_k)$ возьмем N выборок обновляемой последо-

вательности $\{\epsilon_{B2}(t_k), \epsilon_{B2}(t_{k+1}), \dots, \epsilon_{B2}(t_{k+N})\}$, $k = 0, 1, 2, \dots$. Найдем максимальное $\epsilon_{B2\max}$ и минимальное $\epsilon_{B2\min}$ значения из совокупности полученных N выборок обновляемой последовательности $\{\epsilon_{B2}(t_k), \epsilon_{B2}(t_{k+1}), \dots, \epsilon_{B2}(t_{k+N})\}$, $k = 0, 1, 2, \dots$. Таким образом, значения выборок обновляемой последовательности будут лежать на отрезке $[\epsilon_{B2\min}, \epsilon_{B2\max}]$. Определим величину разброса N случайных величин, входящих в выборку обновляемой последовательности,

$$\Delta\epsilon_{B2} = |\epsilon_{B2\max} - \epsilon_{B2\min}|.$$

Разобьем величину разброса $\Delta\epsilon_{B2}$ случайных величин на r «ячеек» группирования. Минимально выбираемое значение величины r – число «ячеек» группирования зависит от количества N выборок обновляемой последовательности и приведено в [11]. Размер «ячейки» группирования будет определяться величиной $\delta\epsilon = \Delta\epsilon_{B2}/r$.

Найдем число n_i , $i = \overline{1, r}$, случайных величин выборки обновляемой последовательности $\{\epsilon_{B2}(t_k), \epsilon_{B2}(t_{k+1}), \dots, \epsilon_{B2}(t_{k+N})\}$, $k = 0, 1, 2, \dots$, попавших в каждую «ячейку» группирования, и рассчитаем относительную частоту $v_i = n_i/N$ попадания выборок в соответствующие «ячейки» группирования.

Для проверки того, что закон распределения выборок обновляемой последовательности $\{\epsilon_{B2}(t_k), \epsilon_{B2}(t_{k+1}), \dots, \epsilon_{B2}(t_{k+N})\}$, $k = 0, 1, 2, \dots$, является гауссовским, используем критерий χ^2 (хи-квадрат) Пирсона. В соответствии с данным критерием за меру расхождения полученных по результатам выборки относительных частот v_i и предполагаемого теоретического гауссовского закона распределения примем величину [11]

$$\chi^2 = N \sum_{j=1}^r \frac{(v_j - P_j)^2}{P_j}, \quad (16)$$

где P_j – вероятность нахождения случайной величины в пределах j -й, $j = \overline{1, r}$, «ячейки» группирования, вычисленная для теоретического гауссовского закона распределения с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ_ϵ^2 , определяемой выражением (15).

Значения P_j , $j = \overline{1, r}$, определяем в соответствии с выражениями:

$$\begin{aligned} P_1 &= \int_{\epsilon_{B2\min}}^{\epsilon_{B2\min} + \delta\epsilon} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\epsilon} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_\epsilon^2}\right) dx; \\ P_2 &= \int_{\epsilon_{B2\min} + \delta\epsilon}^{\epsilon_{B2\min} + 2\delta\epsilon} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\epsilon} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_\epsilon^2}\right) dx; \\ P_r &= \int_{\epsilon_{B2\min} + (r-1)\delta\epsilon}^{\epsilon_{B2\min} + r\delta\epsilon} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\epsilon} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_\epsilon^2}\right) dx. \end{aligned} \quad (17)$$

Зададим доверительную вероятность $P\{\chi^2 > \chi_\alpha^2\} = \alpha$. Обычно уровень значимости α имеет значения порядка $\alpha = 0,05$ или $\alpha = 0,01$. Для выбранной доверительной вероятности определяем доверительную границу χ_α^2 из уравнения

$$P\{\chi^2 > \chi_\alpha^2\} = \int_{\chi_\alpha^2}^{\infty} p_{\chi^2}(x) dx, \quad (18)$$

где p_{χ^2} – плотность вероятности критерия χ^2 (хи-квадрат) Пирсона со степенями свободы $m = r - 3$.

Если полученное значение величины χ^2 меньше доверительной границы χ_α^2

$$\chi^2 < \chi_\alpha^2, \quad (19)$$

то совокупность случайных величин распределена по гауссовскому закону, а это значит, что аномальных измерений на выходе АП СРНС нет, так же как и отсутствуют другие факторы, обеспечивающие искусственное изменение псевдодальности по линейному или другому закону.

Структурная схема обработки информации в навигационных комплексах подвижных объектов, синтезированная в соответствии с алгоритмом (12), (14), (16) – (19), представлена на рис. 1.

В состав структурной схемы обработки информации входят сумматоры, усилители, ключевые устройства и линии задержки. Отличительной особенностью предложенной схемы обработки информации является возможность выявления аномальных измерений методом математической статистики. С этой целью в состав

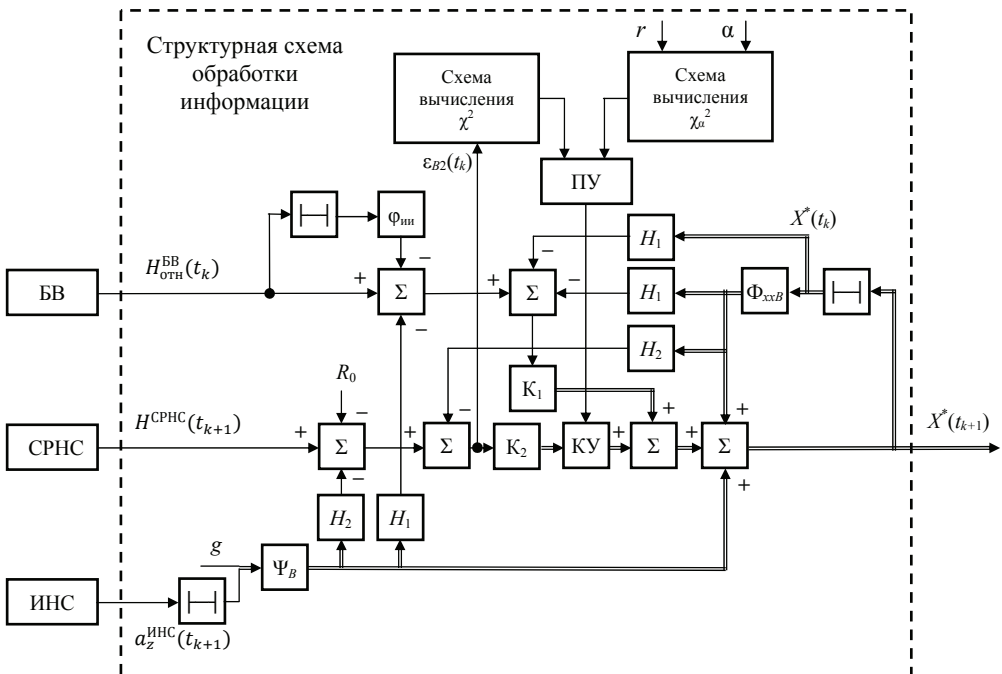


Рис. 1. Структурная схема обработки информации в навигационных комплексах подвижных объектов

схемы введены: схемы вычислений χ^2 и χ_α^2 ; пороговое (ПУ) и ключевое (КУ) устройства. Для вычисления значения χ^2 на схему вычисления χ^2 поступает N выборок обновляемой последовательности $\{\epsilon_{B2}(t_k), \epsilon_{B2}(t_{k+1}), \dots, \epsilon_{B2}(t_{k+N})\}$, $k = 0, 1, 2, \dots$. Для вычисления значения доверительной границы χ_α^2 на схему вычисления подаются значения уровня значимости α и количества «ячеек» группирования r . Пороговое устройство обеспечивает сравнение величин χ^2 и χ_α^2 . Если выполняется условие, что значение χ^2 равно или превышает значение порога, в качестве которого используется значение χ_α^2 , то выдается сигнал на ключевое устройство. В этом случае КУ не пропускает обновляемую последовательность (невязку измерений), сформированную по измерениям СРНС для формирования оценки $\mathbf{X}_B^*(t_{k+1})$, и считается, что измерения СРНС являются аномальными.

Моделирование комплексных оптимальных алгоритмов обработки информации в навигационных системах подвижных наземных объектов

Проверка работоспособности разработанных алгоритмов, позволяющих определять аномальные измерения АП СРНС, проводилась путем статистического компьютерного моделирования.

Моделирование сигнала $H^{\text{СРНС}}(t_{k+1})$, $k = 0, 1, 2, \dots$, на выходе АП радиосигналов СРНС, описываемого выражением (6), проводилось при значениях: $R_0 = 6\,371\,110$ м; $H_{\text{отн}}(t_k) = 1000$ м; $k = 0, 1, 2, \dots$; $\sigma_z = 7$ м.

Моделирование сигнала $H_{\text{отн}}^{\text{БВ}}(t_{k+1})$, $k = 0, 1, 2, \dots$ на выходе БВ, описываемого выражениями (3), (4), осуществлялось при следующих исходных данных: $\Delta H(t_{k+1}) = 7$ м, $k = 0, 1, 2, \dots$; $T = 0,02$ с; $\gamma_{\text{БВ}} = 10$ с⁻¹; $\sigma_{\text{БВ}} = 1$ м. Предполагалось, что объект движется на высоте, которая превышает радиус-вектор геоцентрической (сферической) системы координат R_0 на 1000 м.

Моделирование сигнала $a_Z^{\text{ИНС}}(t_{k+1})$, $k = 0, 1, 2, \dots$ на выходе ИНС, описываемого выражениями (1), (2), осуществлялось при следующих исходных данных: $\alpha_a = 50$ с⁻¹; $\sigma_a = 0,03$ мс⁻¹; $\Delta_{aZ}(t_{k+1}) = 0,2$ мс⁻², $k = 0, 1, 2, \dots$.

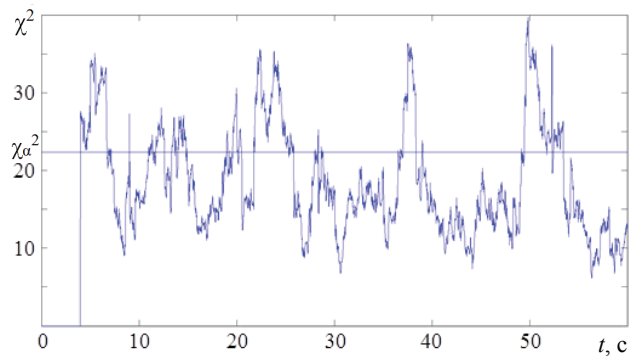
Для вычисления оценок вектора состояния

$$\mathbf{X}_B(t_k) = [H_{\text{отн}}(t_k), V_Z(t_k), \Delta H(t_k), \Delta_{aZ}(t_k)]^T$$

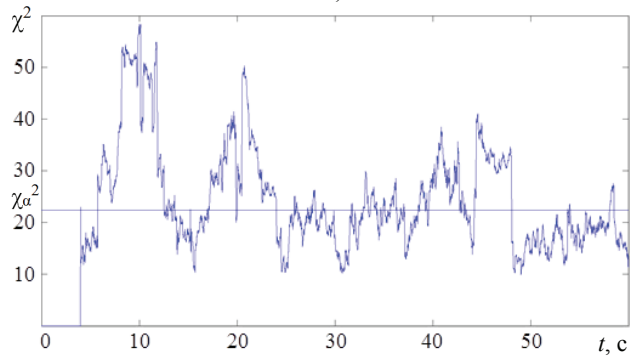
использовалось выражение (12). Для вычисления матрицы оптимальных коэффициентов передачи $\mathbf{K}(t_{k+1})$ – выражение (13). Начальные значения вторых центральных моментов ошибок оценивания компонент вектора состояния вертикального канала брались равными: $p_{11}(t_0) = 300$ м⁻², $p_{22}(t_0) = 20$ м²/с², $p_{11}(t_0) = 625$ м⁻², $p_{11}(t_0) = 0,01$ м⁻²/с⁴.

Вычисление значения χ^2 проводилось по выборке обновляемой последовательности размером $N = 200$. Значение числа ячеек группирования в соответствии с [11] выбиралось равным $r = 16$.

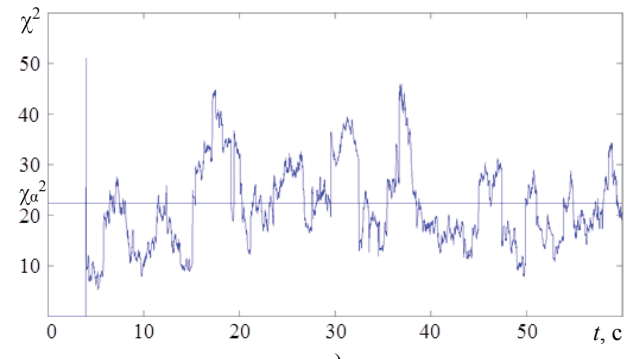
Определение доверительной границы χ_α^2 осуществлялось для плотности вероятности χ^2 (хи-квадрат) при условиях: степень свободы $m = 13$ и уровень значимости $\alpha = 0,05$.



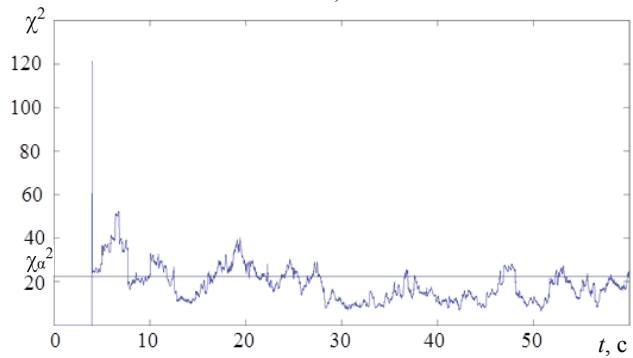
a)



б)



в)



г)

Рис. 2. Гауссовский закон распределения

(реализация значений χ^2 (хи-квадрат) Пирсона для доверительной границы $\chi_{\alpha}^2 = 22,36$)

При моделировании рассматривались два случая. В *первом* случае предполагалось, что сигнал на выходе АП СРНС представляет собой аддитивную смесь истинного значения высоты и шума, описываемого гауссовским законом распределения. В этом случае шумовая составляющая сигнала $n_z(t_k)$ представляла собой взаимонезависимые выборки гауссовского случайного процесса с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией. Для гауссовского закона распределения на рис. 2, *a – г* представлены реализации значений χ^2 (хи-квадрат) Пирсона, полученные в результате моделирования для доверительной границы $\chi_\alpha^2 = 22,36$.

Анализ результатов моделирования показал, что на интервале временного моделирования порядка 60 с имеется достаточно большое число значений χ^2 (хи-квадрат) Пирсона, превышающих значение доверительной границы $\chi_\alpha^2 = 22,36$. Это обусловлено выбранным значением уровня значимости $\alpha = 0,05$ и вполне согласуется с теорией. В результате даже для гауссовского закона распределения это приводит к достаточно большому числу ложных срабатываний.

Во *втором* случае предполагалось, что сигнал на выходе АП СРНС представляет собой аддитивную смесь истинного значения высоты и шума, описываемого равномерным законом распределения. Шумовая составляющая $n_z(t_k)$ представляла собой взаимонезависимые выборки случайного процесса, равномерно распределенного на интервале от нуля до единицы. Данный случай соответствует появлению недостоверных (аномальных) измерений на выходе АП СРНС. Для равномерного закона распределения на рис. 3, *a – г* представлены реализации

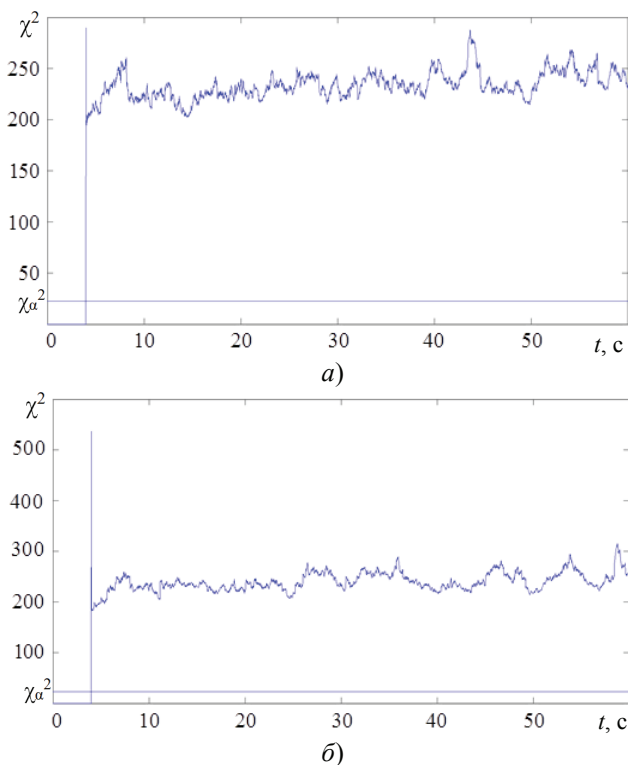


Рис. 3. Равномерный закон распределения (начало)

(реализация значений χ^2 (хи-квадрат) Пирсона для доверительной границы $\chi_\alpha^2 = 22,36$)

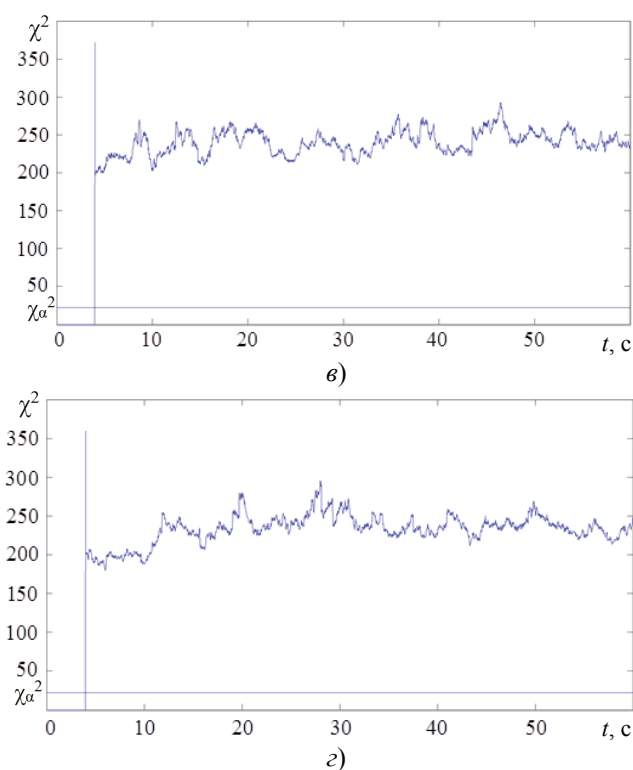


Рис. 3. Окончание. Равномерный закон распределения.

(реализация значений χ^2 (хи-квадрат) Пирсона для доверительной границы $\chi_{\alpha}^2 = 22,36$)

значений χ^2 (хи-квадрат) Пирсона, полученные в результате моделирования для доверительной границы $\chi_{\alpha}^2 = 22,36$.

Анализ результатов моделирования показал, что на интервале временного моделирования порядка 60 с все значения χ^2 (хи-квадрат) Пирсона значительно превышают значение доверительной границы $\chi_{\alpha}^2 = 22,36$. Однако следует отметить, что все значения при этом не опускаются ниже 180.

Заключение

Определение методами математической статистики закона распределения вектора обновляемой последовательности (вектора невязок измерений), формируемого по измерениям СРНС, может быть использовано для установления недостоверных (аномальных) измерений на выходе аппаратуры СРНС. Однако для их использования необходимо вводить допустимое отклонение значения доверительной границы при нормальном законе распределения вектора обновляемой последовательности (вектора невязки измерений).

Список литературы

1. Иванов, А. В. Навигация наземных объектов / А. В. Иванов, Н. А. Иванова. – London, UK : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 120 с.
2. Гришин, Ю. П. Радиотехнические системы / Ю. П. Гришин, В. П. Ипатов, Ю. М. Казаринов, Ю. А. Коломенский, Ю. Д. Ульяницкий ; под ред. Ю. М. Казаринова. – М. : Высшая школа, 1990. – 496 с.

3. Тихонов, В. И. Нелинейная фильтрация и квазикогерентный прием сигналов / В. И. Тихонов, Н. К. Кульман. – М. : Сов. радио, 1975. – 704 с.
4. Тихонов, В. И. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем / В. И. Тихонов, В. Н. Харисов. – М. : Радио и связь, 1991. – 608 с.
5. Ярлыков, М. С. Статистическая теория радионавигации / М. С. Ярлыков. – М. : Радио и связь, 1985. – 344 с.
6. Ярлыков, М. С. Марковская теория оценивания случайных процессов / М. С. Ярлыков, М. А. Миронов. – М. : Радио и связь, 1993. – 460 с.
7. Иванов, А. В. Обработка многомерных сигналов. Нелинейная многомерная обработка сигналов спутниковых радионавигационных систем в комплексах самолетовождения / А. В. Иванов. – М. : Радиотехника, 2012. – 176 с.
8. Кузовков, Н. Т. Инерциальная навигация и оптимальная фильтрация / Н. Т. Кузовков, О. С. Салычев. – М. : Машиностроение, 1982. – 216 с.
9. Бабич, О. А. Обработка информации в навигационных комплексах / О. А. Бабич. – М. : Машиностроение, 1991. – 512 с.
10. Иванов, А. В. Комплексные оптимальные алгоритмы обработки информации в навигационных системах подвижных наземных объектов с контролем целостности навигационного обеспечения / А. В. Иванов // Радиотехника. – 2010. – № 5. – С. 12 – 17.
11. Тихонов, В. И. Статистическая радиотехника / В. И. Тихонов. – М. : Радио и связь, 1982. – 625 с.

Identification of Anomalous Measurements of Radio Signals by a Satellite Radio Navigation System by the Method of Statistical Processing of Measurement Discharges

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

Department of Radio Engineering, resbn@mail.ru; TSTU, Tambov, Russia

Keywords: anomalous measurements; determination of coordinates; optimal information processing algorithms; mobile ground object; satellite radio navigation system.

Abstract: Using the methods of the Markov theory of optimal estimation of random processes, optimal complex algorithms for processing information in navigation complexes of mobile ground objects based on satellite radio navigation systems are synthesized. To identify anomalous measurements of radio signals of a satellite radio navigation system, the law of distribution of measurement residuals was determined by the method of statistical processing. Computer modeling of the developed algorithms has been carried out.

References

1. Ivanov A.V., Ivanova N.A. *Navigatsiya nazemnykh ob'yektov* [Navigation of ground objects], London, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013, 120 p. (In Russ.).
2. Grishin Yu.P., Ipatov V.P., Kazarinov Yu.M., Kolomenskiy Yu.A., Ul'yanitskiy Yu.D.; Yu.M. Kazarinov (Ed.) *Radiotekhnicheskiye sistemy* [Radio engineering systems], Moscow: Vysshaya shkola, 1990, 496 p. (In Russ.).
3. Tikhonov V.I., Kul'man N.K. *Nelineynaya fil'tratsiya i kvazikogerentnyy priyem signalov* [Nonlinear filtering and quasi-coherent reception of signals], Moscow: Sovetskoye radio, 1975, 704 p. (In Russ.).
4. Tikhonov V.I., Kharisov V.N. *Statisticheskiy analiz i sintez radiotekhnicheskikh ustroystv i sistem* [Statistical analysis and synthesis of radio engineering devices and systems], Moscow: Radio i svyaz', 1991, 608 p. (In Russ.).

5. Yarlykov M.S. *Statisticheskaya teoriya radionavigatsii* [Statistical theory of radio navigation], Moscow: Radio i svyaz', 1985, 344 p. (In Russ.).
 6. Yarlykov M.S., Mironov M.A. *Markovskaya teoriya otsenivaniya sluchaynykh protsessov* [Markov theory of estimation of random processes], Moscow: Radio i svyaz', 1993, 460 p. (In Russ.).
 7. Ivanov A.V. *Obrabotka mnogomernykh signalov. Nelineynaya mnogomernaya obrabotka signalov sputnikovykh radionavigatsionnykh sistem v kompleksakh samoletovozhdeniya* [Processing of multidimensional signals. Nonlinear multidimensional signal processing of satellite radio navigation systems in aircraft navigation systems], Moscow: Radiotekhnika, 2012, 176 p. (In Russ.).
 8. Kuzovkov N.T., Salychev O.S. *Inertsial'naya navigatsiya i optimal'naya fil'tratsiya* [Inertial navigation and optimal filtering], Moscow: Mashinostroyeniye, 1982, 216 p. (In Russ.).
 9. Babich O.A. *Obrabotka informatsii v navigatsionnykh kompleksakh* [Information processing in navigation systems], Moscow: Mashinostroyeniye, 1991, 512 p. (In Russ.).
 10. Ivanov A.V. [Complex optimal algorithms for information processing in navigation systems of mobile ground objects with control of the integrity of navigation support], *Radiotekhnika* [Radio engineering], 2010, no. 5, pp. 12-17. (In Russ., abstract in Eng.).
 11. Tikhonov V.I. *Statisticheskaya radiotekhnika* [Statistical radio engineering], Moscow: Radio i svyaz', 1982, 625 p. (In Russ.).
-

Bestimmung anormaler Messungen von Funksignalen durch ein Satelliten-Funk-Navigationssystem durch die Methode der statistischen Verarbeitung von Messfehlern

Zusammenfassung: Mit den Methoden der Markov-Theorie der optimalen Schätzung von zufälligen Prozessen sind optimale komplexe Algorithmen zur Verarbeitung von Informationen in Navigationskomplexen mobiler Bodenobjekte auf Basis von Satellitenfunknavigationssystemen synthetisiert. Um anomale Messungen der Funksignale des Satellitennavigationssystems zu erkennen, ist das Gesetz zur Verteilung der Messresistenz durch statistische Verarbeitung festgelegt. Eine Computermodellierung der entwickelten Algorithmen ist durchgeführt.

Détermination des mesures anormales des signaux radio par le système de radionavigation de satellite par le traitement statistique des résidus de mesure

Résumé: Par les méthodes de la théorie de Markov de l'évaluation optimale des processus aléatoires sont synthétisés des algorithmes complexes optimaux pour le traitement de l'information dans les complexes de navigation d'objets terrestres mobiles basés sur des systèmes de radionavigation des satellite. Pour détecter les mesures anormales des signaux radio du système de radionavigation de satellite, la loi de distribution des résidus de mesure du traitement statistique est déterminée. Est réalisée une simulation informatique des algorithmes élaborés

Авторы: *Иванов Александр Васильевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Радиотехника»; *Москвитин Сергей Петрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехника»; *Иванов Андрей Александрович* – магистрант; *Лежнева Наталья Александровна* – аспирант кафедры «Радиотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

ПРИМЕНЕНИЕ СТОХАСТИЧЕСКОЙ SIR-МОДЕЛИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭПИДЕМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

А. Б. Борисенко¹, В. А. Немтинов¹, А. А. Борисенко²

*Кафедра «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении» (1);
borisenko.ab@mail.tstu.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия;
кафедра гигиены условий воспитания, обучения, труда и радиационной гигиены (2),
ФГБОУ ВО «Северо-Западный государственный медицинский университет
им. И. И. Мечникова», Санкт-Петербург, Россия*

Ключевые слова: компартментные модели; моделирование эпидемического процесса; метод Эйлера–Маруямы; стохастическая модель SIR; SMath Studio.

Аннотация: Представлено моделирование развития эпидемического процесса с использованием стохастической компартментной модели SIR (модели Кермака–МакКендрика). Математическая модель процесса показана в виде системы стохастических дифференциальных уравнений. Рассмотрена возможность практического применения программы SMath Studio для решения системы стохастических дифференциальных уравнений математической модели с использованием метода Эйлера–Маруямы. Приведены результаты численных экспериментов.

Введение

Задачи прогнозирования играют важную роль в самых различных областях человеческой деятельности, в том числе науке, экономике, производстве и пр. [1, 2]. При этом прогнозирование – один из ключевых моментов при принятии решений [3, 4]. Прогнозирование эпидемической ситуации позволяет разработать и обосновать мероприятия по предупреждению распространения инфекционных болезней среди населения, а также ликвидировать негативные последствия, вызванные эпидемиями [5]. Один из методов исследования динамики эпидемических процессов – математическое моделирование [6]. Применение адекватных математических моделей распространения заболеваний играет важную роль в понимании динамики передачи различных патогенов и позволяет описать пространственные и временные закономерности распространения, а также помочь в изучении факторов, влияющих на передачу и лечение той или иной инфекции.

Одним из видов математических моделей, широко используемых в эпидемиологии, являются компартментные (камерные) модели (англ. – *compartmental model*) [7, 8]. В данных математических моделях вся исследуемая популяция или сообщество разбивается на несколько групп (компартментов). К таким группам относятся: восприимчивые (*Susceptible*), инфицированные (*Infectious*), выздоровевшие (*Recovered*). В более сложных моделях могут учитываться умершие (*Died*), а также скрытые (латентные) носители в инкубационном периоде (*Exposed*) [9, 10]. В каждый конкретный момент времени развитие эпидемического процесса в сообществе или популяции зависит от текущего распределения индивидов по группам.

Эпидемическая ситуация при этом описывается, как правило, системой дифференциальных уравнений (обыкновенных или стохастических), которая определяет динамику перехода индивидуумов из одной группы в другую. В некоторых моделях учитываются также число инфицированных, находящихся в инкубационном периоде, число умерших и пр. [5].

Детерминированная SIR-модель

Одной из простейших моделей является детерминированная SIR-модель (*Susceptible – Infectious – Recovered*) с формированием устойчивого иммунитета, предложенная шотландскими учеными У. Кермаком и А. МакКендриком (*Kermack–McKendrick model*) [11]. Рассматриваемая модель не учитывает число умерших и носителей в инкубационном периоде [8, 12].

Вся популяция, состоящая из N индивидуумов, делится на три группы: восприимчивые к заболеванию S ; зараженные, инфицирующие восприимчивых I ; выздоровевшие, получившие долговременный иммунитет R (рис. 1). Передача инфекции в популяцию осуществляется от инфицированных индивидов I к восприимчивым S . Переболевшие индивиды R приобретают иммунитет и не могут быть заражены повторно. При этом $S + I + R = N$.

Детерминированная модель SIR описывается системой обыкновенных линейных дифференциальных уравнений (1):

$$\begin{cases} \frac{dS(t)}{dt} = -\beta \frac{S(t)I(t)}{N}; \\ \frac{dI(t)}{dt} = \beta \frac{S(t)I(t)}{N} - \gamma I(t); \\ \frac{dR(t)}{dt} = \gamma I(t), \end{cases} \quad (1)$$

где $\beta(S(t)I(t))/N$ – скорость, с которой восприимчивая популяция сталкивается с инфицированной популяцией, что приводит к передаче болезни (скорость распространения инфекции в популяции), человек/сут.; $\gamma I(t)$ – скорость, с которой инфицированная популяция выздоравливает и становится устойчивой к дальнейшему заражению (скорость выздоровления), человек/сут.; $S(t)$, $I(t)$, $R(t)$ – численности соответственно восприимчивой, инфицированной и выздоровевшей групп, человек; β и γ – параметры математической модели, сут.⁻¹. При этом $S(t) + I(t) + R(t) = N$, где N – численность популяции, человек.

Рассмотрим подробнее параметры математической модели β и γ . Параметр β – константа скорости заражения (интенсивность заражения), связанная с передачей инфекции. Соответствующая постоянная времени $\tau_{\text{infect}} = \beta^{-1}$ (человек)

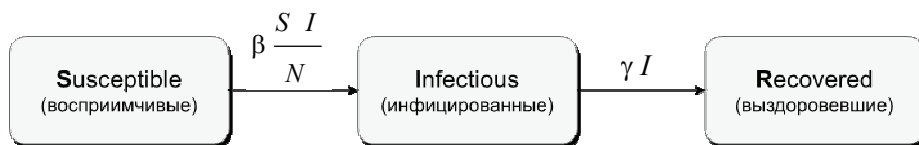


Рис. 1. Схема камерной модели SIR

определяет контагиозный (*лат. contagiosus* – заразный) период, соответствующий экспоненциальному росту числа новых инфекций в начальный момент времени, когда популяция состоит целиком из восприимчивой группы $S(0) = N$. Параметр γ – константа скорости выздоровления (интенсивность выздоровления). Соответствующая постоянная времени $\tau_{\text{recov}} = \gamma^{-1}$ представляет собой среднее время выздоровления после инфицирования, сут. По известным значениям β и γ можно рассчитать такой важный для эпидемического процесса показатель, как базовое репродуктивное число (*Basic Reproduction Number*), определяющее контагиозность (заразность) инфекционного заболевания $R_0 = \beta/\gamma$. Базовое репродуктивное число (индекс репродукции) показывает среднее число индивидуумов, которых заразит один инфицированный, попавший в полностью неиммунизированное окружение. Если $R_0 > 1$, то скорость заражения растет и эпидемия активно развивается, если $R_0 < 1$, то скорость заражения снижается и эпидемия затухает. Следует отметить, что на значение базового репродуктивного числа можно влиять путем проведения различных санитарно-противоэпидемических мероприятий (масочный режим, социальная дистанция, карантин, вакцинация и т.п.).

Для обобщения математической модели (1) можно перейти от непосредственного количества человек в группах к долям (фракциям). Для этого определим доли соответственно восприимчивой, инфицированной и выздоровевшей групп:

$$s(t) = S(t)/N; \quad i(t) = I(t)/N; \quad r(t) = R(t)/N.$$

При этом $s(t) + i(t) + r(t) = 1$ – инвариант. В результате система уравнений (1) приобретает вид:

$$\begin{cases} \frac{ds(t)}{dt} = -\beta s(t) i(t); \\ \frac{di(t)}{dt} = \beta s(t) i(t) - \gamma i(t); \\ \frac{dr(t)}{dt} = \gamma i(t). \end{cases} \quad (2)$$

После добавления к системе обыкновенных дифференциальных уравнений (2) начальных условий $s(0) = s_{\text{init}}$, $i(0) = i_{\text{init}}$, $r(0) = r_{\text{init}}$ будет получена задача Коши.

В модели (2) используется ряд следующих допущений: численность популяции считается неизменной на всем временном отрезке моделирования (не учитывается изменение размера популяции за счет естественных рождений и смертей); инкубационный период заболевания пренебрежимо мал (заражение происходит мгновенно); после болезни выздоровевшие приобретают постоянный иммунитет (повторного заражения никогда не происходит); болезнь никогда не приводит к смерти.

Таким образом, модели SIR применяются для описания эпидемических процессов, вызываемых вирусами с относительно легким течением: группы вирусов, вызывающих острые респираторные вирусные инфекции (**ОРВИ**), и некоторые штаммы вируса гриппа (*influenza virus*) [7, 13].

Стохастическая SIR-модель

В детерминированной математической модели (2) предполагается, что все параметры математической модели известны: число новых заразившихся пропорционально числу зараженных и восприимчивых к заражению индивидуумов.

При этом при одинаковых начальных условиях и одинаковых параметрах математической модели всегда будет получено одинаковое решение. Однако в действительности эпидемический процесс подвержен случайным флуктуациям. Новые случаи заражения фактически происходят в условиях неопределенности, которую детерминированная модель учесть не может [14]. Таким образом, становится актуальным применение стохастических математических моделей, учитывающих случайную составляющую. В качестве примеров исследований стохастических моделей для моделирования развития эпидемий можно привести обзорные работы [14 – 16]. При этом стохастическая модель подразумевает, что при одинаковых начальных условиях и параметрах математической модели решение каждый раз будет случайным образом изменяться [17].

Одним из способов моделирования стохастических процессов является использование марковских цепей [18], то есть последовательности случайных событий, характеризующейся тем свойством, что при известном настоящем будущее независимо от прошлого. Цепи Маркова часто называют системами без последствия или системами с отсутствием памяти [19].

Другим способом моделирования является применение стохастических дифференциальных уравнений. Стохастическое дифференциальное уравнение (СДУ) – дифференциальное уравнение, в котором один или несколько членов представляют собой стохастический процесс, приводящий к решению, которое само по себе является стохастическим процессом. В данной работе используется простейшая система стохастических дифференциальных уравнений, представленная в источниках [20, 21]:

$$\begin{cases} \frac{ds(t)}{dt} = -\beta s(t) i(t) - \sigma_1 s(t) i(t) dW(t); \\ \frac{di(t)}{dt} = \beta s(t) i(t) - \gamma i(t) + \sigma_1 s(t) i(t) dW(t) - \sigma_2 i(t) dW(t); \\ \frac{dr(t)}{dt} = \gamma i(t) + \sigma_2 i(t) dW(t), \end{cases} \quad (3)$$

где $dW(t)$ – производная стохастического винеровского процесса, введенная в систему дифференциальных уравнений исходя из предположения, что внешние случайные возмущения представляют собой белый шум; σ_1, σ_2 – константы, описывающие интенсивность стохастического окружения для процессов заражения и выздоровления соответственно [22].

При этом стохастический винеровский процесс (броуновское движение) $W(t)$ является гауссовским процессом с независимыми приращениями, нулевым математическим ожиданием и дисперсией $\text{Var } W(t) = t$. В дальнейшем на этот факт следует обратить внимание при компьютерной реализации решения системы стохастических дифференциальных уравнений, так как часто стандартные датчики псевдослучайных чисел реализуют не нормальный (*normal*), а равномерный (*uniform*) закон распределения. Следует также отметить, что при $\sigma_1 = 0; \sigma_2 = 0$ стохастическая модель (3) становится детерминированной (2).

Алгоритм решения задачи

Существует несколько численных методов для решения СДУ, в том числе метод Эйлера–Маруямы (*Euler–Maruyama method*), метод Мильштейна (*Milstein method*), стохастический метод Хойна (*stochastic Heun's method*), стохастический метод Рунге–Кутты (*stochastic Runge-Kutta method*) [23].

В данной статье используем метод Эйлера–Маруямы, являющийся одним из простейших численных методов для решения системы СДУ [24]. Для стохастической SIR-модели (3) схема Эйлера–Маруямы выглядит следующим образом [20, 21]:

$$\begin{cases} t_{j+1} = t_j + \Delta t; \\ W_{j+1} = RND_{\text{Normal}}(0; \sqrt{\Delta t}); \\ \Delta W_{j+1} = W_{j+1} - W_j; \\ s_{j+1} = s_j + (-\beta s_j i_j) \Delta t - \sigma_1 s_j i_j \Delta W_{j+1}; \\ i_{j+1} = i_j + (\beta s_j i_j - \gamma_j i_j) \Delta t + \sigma_1 s_j i_j \Delta W_{j+1} - \sigma_2 i_j \Delta W_{j+1}; \\ r_{j+1} = r_j + \gamma_j i_j + \sigma_2 i_j \Delta W_{j+1}. \end{cases} \quad (4)$$

При этом $s_0 = s_{\text{init}}$, $i_0 = i_{\text{init}}$, $r_0 = r_{\text{init}}$, $W_0 = RND_{\text{Normal}}(0; \sqrt{\Delta t})$, $\Delta W_0 = W_0$. Выражение $RND_{\text{Normal}}(0; \sqrt{\Delta t})$ обозначает функцию, генерирующую псевдослучайные числа с нормальным законом распределения (математическое ожидание равно 0, стандартное отклонение $\sqrt{\Delta t}$).

В настоящее время Правительство Российской Федерации проводит политику последовательного перехода организаций в различных областях деятельности на преимущественное использование отечественного и свободного программного обеспечения [25].

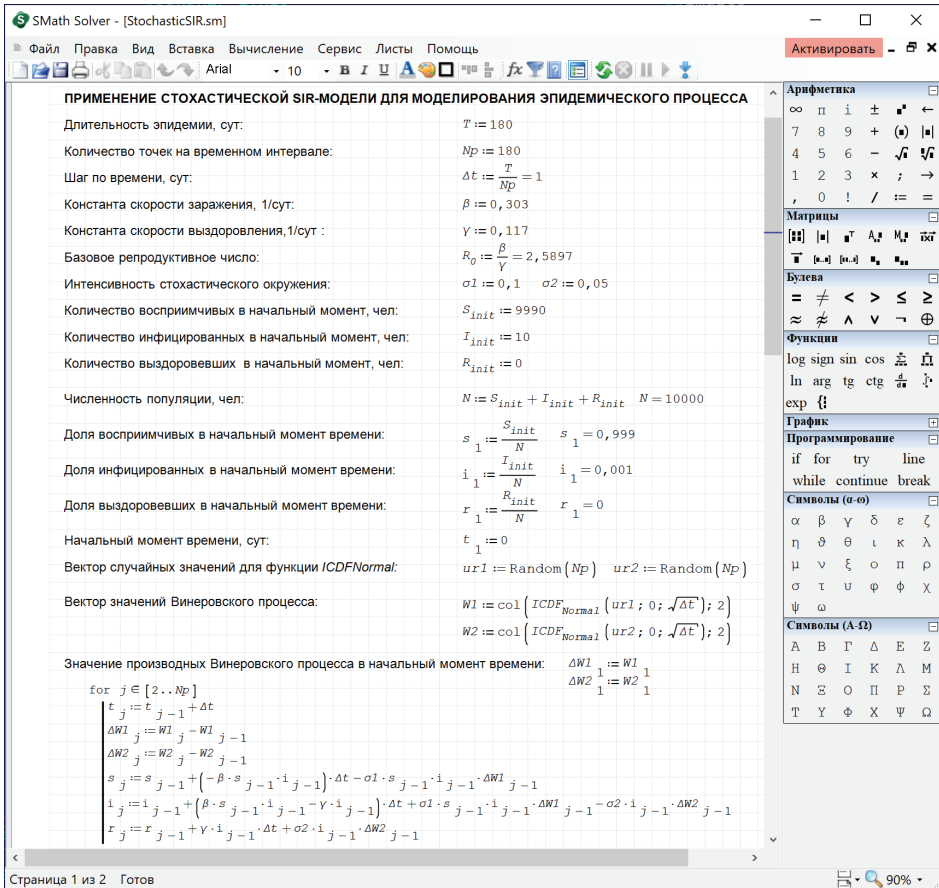


Рис. 2. Фрагмент решения задачи (4) в системе SMATH Studio

При проведении имитационных экспериментов использован программный пакет для вычисления математических выражений и построения графиков функций SMath Studio [26] с установленным дополнением Statistical Tools.

Программа SMath Studio функционально является аналогом коммерческого пакета PTC MathCAD и обладает следующими преимуществами: доступность, малый занимаемый объем, возможность установки на различные платформы, в том числе на стационарные компьютеры под управлением Windows или Linux, а также на мобильные устройства под управлением Android или iOS. Уникальной возможностью пакета SMath Studio является сохранение расчетов в формате автономных исполняемых exe-файлов. Кроме того, к основным возможностям программы относятся: мультиязычный интерфейс; поддержка единиц измерений (как встроенных, так и пользовательских); поддержка программирования (конструкций *if, for, while*); выполнение расчетов как в символьной, так и численной форме; работа с бесконечностью и др. Программа зарегистрирована в реестре российского программного обеспечения.

Дополнение Statistical Tools содержит программные средства, позволяющие в том числе генерировать нормально распределенные псевдослучайные числа.

На рисунке 2 представлен фрагмент решения задачи (4) в программе SMath Studio.

Результаты экспериментов

Исходные значения параметров модели взяты из работы [27]: $\beta = 0,303$, $\gamma = 0,117$.

На рисунке 3, *a* представлен результат использования модели SIR при значениях параметров $\sigma_1 = 0$; $\sigma_2 = 0$ (в этом случае стохастические члены в модели (4) обнуляются и модель функционирует как детерминированная). На рисунке 3, *б* представлен результат использования модели SIR при значениях параметров $\sigma_1 = 0,1$; $\sigma_2 = 0,05$.

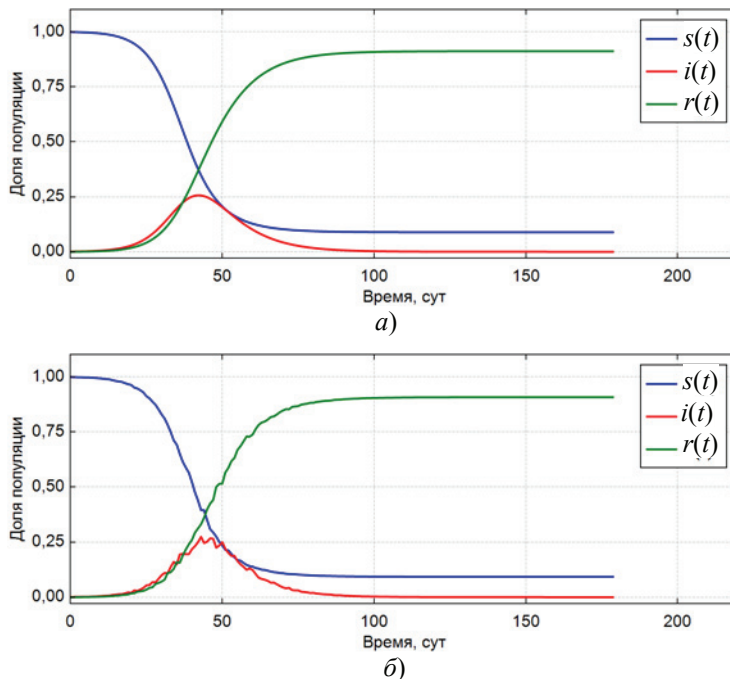


Рис. 3. Примеры использования SIR-модели при $\beta = 0,303$, $\gamma = 0,117$:

a – $\sigma_1 = 0$, $\sigma_2 = 0$; *б* – $\sigma_1 = 0,1$, $\sigma_2 = 0,05$

Графики показывают состояние популяции в процессе развития эпидемической ситуации.

Заключение

Для моделирования процесса развития эпидемического процесса с использованием стохастической SIR-модели успешно использован отечественный программный пакет SMath Studio. Изменяя значения параметров модели β , γ , σ_1 и σ_2 , возможно проигрывать различные сценарии развития эпидемии.

Документ StochasticSIR.sm в формате SMath Studio доступен для скачивания по ссылке: <https://disk.yandex.ru/d/gTXqg4PEzRPDvA>.

Список литературы

1. Пахомов, А. Н. Прогнозирование типа кинетической кривой в процессе сушки картофельной мезги / А. Н. Пахомов, Н. Ц. Гагапова, Ю. В. Пахомова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2022. – Т. 28, № 1. – С. 076 – 084. doi: 10.17277/vestnik.2022.01.pp.076-084
2. Немтинов, В. А. Оценка геохимического состояния малых рек с использованием теории нечетких множеств / В. А. Немтинов, Ю. В. Немтинова, А. Б. Борисенко // Экология и промышленность России. – 2019. – Т. 23, № 9. – С. 54 – 59. doi: 10.18412/1816-0395-2019-9-54-59
3. Информационная поддержка принятия решений при проведении технологического обслуживания токарных станков / В. А. Немтинов, В. Ю. Бобылев, Ю. В. Немтинова, А. Б. Борисенко // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2020. – Т. 26, № 2. – С. 220 – 229. doi: 10.17277/vestnik.2020.02.pp.220-229
4. Карпушкин, С. В. Оптимизация функционирования оборудования действующего многоассортиментного производства при реализации заказа на выпуск нового продукта / С. В. Карпушкин, М. Н. Краснянский, А. Б. Борисенко // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2016. – Т. 22, № 2. – С. 238 – 254. doi: 10.17277/vestnik.2016.02.pp.238-254
5. Моделирование эпидемической ситуации с учетом внешних рисков / Ю. Б. Гришунина, Н. А. Контаров, Г. В. Архарова, Н. В. Юминова // Эпидемиология и вакцинопрофилактика. – 2014. – Т. 78, № 5. – С. 61 – 66.
6. Hethcote, H. W. The Mathematics of Infectious Diseases / H. W. Hethcote // SIAM Review. – 2000. – Vol. 42, No. 4. – P. 599 – 653. doi: 10.1137/S0036144500371907
7. Применение универсальной математической модели эпидемического процесса «SRID» для прогноза развития эпидемии COVID-19 в городе Москва / Ю. С. Букин, Ю. П. Джиев, А. Н. Бондарюк [и др.] // PREPRINTS.RU. – 2020. doi: 10.24108/preprints-3112045
8. Abou-Ismaïl, A. Compartmental Models of the COVID-19 Pandemic for Physicians and Physician-Scientists / A. Abou-Ismaïl // SN Comprehensive Clinical Medicine. – 2020. – Vol. 2, No. 7. – P. 852 – 858. doi: 10.1007/s42399-020-00330-z
9. Mathematical and Computer Modeling of COVID-19 Transmission Dynamics in Bulgaria by Time-Dependent Inverse SEIR Model / S. Margenov, N. Popivanov, I. Ugrinova [et al.] // AIP Conference Proceedings. – 2021. – P. 090024. doi: 10.1063/5.0041868
10. Тамм, М. В. Коронавирусная инфекция в Москве: прогнозы и сценарии / М. В. Тамм // Фармакоэкономика. Современная фармакоэкономика и фармакоэпидемиология. – 2020. – Т. 13, № 1. – С. 43 – 51. doi: 10.17749/2070-4909.2020.13.1.43-51

11. Kermack, W. O. A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics / W. O. Kermack, A. G. McKendrick // *Proceedings of the Royal Society of London*. – 1927. – Vol. 115, No. 772. – P. 700 – 721. doi: 10.1098/rspa.1927.0118
12. Piccirillo, V. Nonlinear Control of Infection Spread Based on a Deterministic SEIR Model / V. Piccirillo // *Chaos, Solitons & Fractals*. – 2021. – Vol. 149. – P. 111051. doi: 10.1016/j.chaos.2021.111051
13. Forecasting Seasonal Influenza with a State-Space SIR Model / D. Osthus, K. S. Hickmann, P. C. Caragea [et al.] // *The Annals of Applied Statistics*. – 2017. – Vol. 11, No. 1. – P. 202 – 224. doi: 10.1214/16-AOAS1000
14. Allen, L. J. S. A Primer on Stochastic Epidemic Models: Formulation, Numerical Simulation, and Analysis / L. J. S. Allen // *Infectious Disease Modelling*. – 2017. – Vol. 2, No. 2. – P. 128 – 142. doi: 10.1016/j.idm.2017.03.001
15. Britton, T. Stochastic Epidemic Models: A Survey / T. Britton // *Mathematical Biosciences*. – 2010. – Vol. 225, No. 1. – P. 24 – 35. doi: 10.1016/j.mbs.2010.01.006
16. Gibson, G. J. Comparison and Assessment of Epidemic Models / G. J. Gibson, G. Streftaris, D. Thong // *Statistical Science*. – 2018. – Vol. 33, No. 1. – P. 19 – 33. doi: 10.1214/17-STS615.
17. Sani, A. Connection of CTMC Process, Deterministic and Stochastic Differential Equations in Modeling of Epidemics / A. Sani, Mukhsar, B. Abapihi // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 1899, No. 1. – P. 012111. doi: 10.1088/1742-6596/1899/1/012111
18. Allen, L. J. S. Comparison of Deterministic and Stochastic SIS and SIR Models in Discrete Time / L. J. S. Allen, A. M. Burgin // *Mathematical Biosciences*. – 2000. – Vol. 163, No. 1. – P. 1 – 33. doi: 10.1016/S0025-5564(99)00047-4
19. Кацман, Ю. Я. Марковские цепи применительно к моделям гетерогенных сред / Ю. Я. Кацман. – Томск : Томский политехнический университет, 2013. – 131 с.
20. Maki, Y. Infectious Disease Spread Analysis Using Stochastic Differential Equations for SIR Model / Y. Maki, H. Hirose // *2013 4th International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation*. – IEEE, 2013. – P. 152 – 156. doi: 10.1109/ISMS.2013.13
21. Simha, A. A Simple Stochastic SIR Model for COVID 19 Infection Dynamics for Karnataka: Learning from Europe / A. Simha, R. V. Prasad, S. Narayana // *arXiv:2003.11920v3 [q-bio.PE]* 16 Apr 2020. doi: 10.48550/ARXIV.2003.11920
22. Rao, F. Dynamics Analysis of a Stochastic SIR Epidemic Model / F. Rao // *Abstract and Applied Analysis*. – 2014. – Vol. 2014. – P. 1 – 9. doi: 10.1155/2014/356013
23. Wilkie, J. Numerical Methods for Stochastic Differential Equations / J. Wilkie // *Physical Review E*. – 2004. – Vol. 70, No. 1. – P. 017701. doi: 10.1103/PhysRevE.70.017701
24. Bayram, M. Numerical Methods for Simulation of Stochastic Differential Equations / M. Bayram, T. Partal, G. O. Buyukoz // *Advances in Difference Equations*. – 2018. – Vol. 2018, No. 1. – P. 17. doi: 10.1186/s13662-018-1466-5
25. Об утверждении методических рекомендаций по переходу государственных компаний на преимущественное использование отечественного программного обеспечения, в том числе отечественного офисного программного обеспечения: приказ Минкомсвязи России. – URL : <https://digital.gov.ru/ru/documents/6294> (дата обращения : 20.10.2022).
26. Ивашов, А. SMath Studio. – URL : <https://ru.smath.com/> (дата обращения : 20.10.2022).
27. Risk Assessment of Novel Coronavirus COVID-19 Outbreaks Outside China / P. Boldog, T. Tekeli, Z. Vizi [et al.] // *Journal of Clinical Medicine*. – 2020. – Vol. 9, No. 2. – P. 571. doi: 10.3390/jcm9020571

Application of the Stochastic SIR Model for Simulation of the Epidemic Process

A. B. Borisenko¹, V. A. Nemtinov¹, A. A. Borisenko²

Department of Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering (1);

borisenko.ab@mail.tstu.ru; TSTU, Tambov, Russia;

*Chair of Hygiene of Educational, Training, and Labor Conditions,
and Radiation Hygiene (2), North-Western State Medical University
named after I. I. Mechnikov, St. Petersburg, Russia*

Keywords: compartmental models; modeling of the epidemic process; Euler–Maruyama method; stochastic SIR model; SMath Studio.

Abstract: Simulation of the development of the epidemic process using the stochastic compartment model SIR (Kermack–McKendrick model) is shown. The mathematical model of the process is presented as a system of stochastic differential equations. The possibility of practical application of the SMath Studio program for solving a system of stochastic differential equations of a mathematical model using the Euler–Maruyama method is considered. The results of numerical experiments are presented.

References

1. Pakhomov A.N., Gatapova N.Ts., Pakhomova Yu.V. [Prediction of the type of kinetic curve in the process of drying potato pulp], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2022, vol. 28, no. 1, pp. 76-84. doi: 10.17277/vestnik.2022.01.pp.076-084 (In Russ., abstract in Eng.)
2. Nemtinov V.A., Nemtinova Yu.V., Borisenko A.B. [Assessment of the geochemical state of small rivers using the theory of fuzzy sets], *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2019, vol. 23, no. 9, pp. 54-59. doi: 10.18412/1816-0395-2019-9-54-59 (In Russ., abstract in Eng.)
3. Nemtinov V.A., Bobylev V.Yu., Nemtinova Yu.V., Borisenko A.B. [Information support for decision making during technological maintenance of lathes], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2020, vol. 26, no. 2, pp. 220-229. doi: 10.17277/vestnik.2020.02.pp.220-229 (In Russ., abstract in Eng.)
4. Karpushkin S.V., Krasnyanskiy M.N., Borisenko A.B. [Optimization of functioning of the equipment of the existing multi-assortment production in the implementation of an order for the production of a new product], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 2, pp. 238-254. doi: 10.17277/vestnik.2016.02.pp.238-254 (In Russ., abstract in Eng.)
5. Grishunina Yu.B., Kontarov N.A., Arkharova G.V., Yuminova N.V. [Modeling the epidemic situation taking into account external risks], *Epidemiologiya i vaktsinoprofilaktika* [Epidemiology and vaccine prevention], 2014, vol. 78, no. 5, pp. 61-66. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Hethcote H.W. The Mathematics of Infectious Diseases, *SIAM Review*. 2000, vol. 42, no. 4, pp. 599-653. doi: 10.1137/S0036144500371907.
7. Bukin Yu.S., Dzhioyev Yu.P., Bondaryuk A.N., Tkachev S.Ye., Zlobin V.I. [Application of the universal mathematical model of the epidemic process "SRID" to predict the development of the COVID-19 epidemic in the city of Moscow], PREPRINTS.RU. 2020. doi: 10.24108/preprints-3112045 (In Russ.).
8. Abou-Ismaïl A. Compartmental Models of the COVID-19 Pandemic for Physicians and Physician-Scientists, *SN Comprehensive Clinical Medicine*. 2020, vol. 2, no. 7, pp. 852-858. doi: 10.1007/s42399-020-00330-z

9. Margenov S., Popivanov N., Ugrinova I. Harizanov S., Hristov T. Mathematical and computer modeling of COVID-19 transmission dynamics in Bulgaria by time-depended inverse SEIR model, *AIP Conference Proceedings*. 2021, vol. 2333, Is. 1, pp. 090024. doi: 10.1063/5.0041868
10. Tamm M.V. [Coronavirus infection in Moscow: forecasts and scenarios], *Farmakoekonomika. Sovremennaya farmakoekonomika i farmakoepidemiologiya* [Pharmacoeconomics. Modern pharmacoeconomics and pharmacoepidemiology], 2020, vol. 13, no. 1, pp. 43-51. doi: 10.17749/2070-4909.2020.13.1.43-51 (In Russ.).
11. Kermack W.O., McKendrick A.G. A contribution to the mathematical theory of epidemics, *Proceedings of the royal society of London*, 1927, vol. 115, no. 772, pp. 700-721. doi: 10.1098/rspa.1927.0118
12. Piccirillo V. Nonlinear control of infection spread based on a deterministic SEIR model, *Chaos, Solitons & Fractals*, 2021, vol. 149, pp. 111051. doi: 10.1016/j.chaos.2021.111051
13. Osthus D., Hickmann K.S., Caragea P.C. Higdon D., Del Valle S.Y. Forecasting seasonal influenza with a state-space SIR model, *The Annals of Applied Statistics*, 2017, vol. 11, no. 1, pp. 202-224. doi: 10.1214/16-AOAS1000
14. Allen L.J.S. A primer on stochastic epidemic models: Formulation, numerical simulation, and analysis, *Infectious Disease Modelling*, 2017, vol. 2, no. 2, pp. 128-142. doi: 10.1016/j.idm.2017.03.001
15. Britton T. Stochastic epidemic models: A survey, *Mathematical Biosciences*, 2010, vol. 225, no. 1, pp. 24-35. doi: 10.1016/j.mbs.2010.01.006
16. Gibson G.J., Streftaris G., Thong D. Comparison and Assessment of Epidemic Models, *Statistical Science*, 2018, vol. 33, no. 1, pp. 19-33. doi: 10.1214/17-STS615
17. Sani A., Mukhsar M., Abapihi B. Connection of CTMC process, deterministic and stochastic differential equations in modeling of epidemics, *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1899, no. 1, pp. 012111. doi: 10.1088/1742-6596/1899/1/012111
18. Allen L.J.S., Burgin A.M. Comparison of Deterministic and Stochastic SIS and SIR Models in Discrete Time, *Mathematical Biosciences*, 2000, vol. 163, no. 1, pp. 1-33. doi: 10.1016/S0025-5564(99)00047-4
19. Katsman Yu.Ya. *Markovskiy tepey primenitel'no k modelyam geterogennykh sred* [Markov chains as applied to models of heterogeneous media], Tomsk: Tomskiy politekhnicheskiy universitet, 2013, 131 p. (In Russ.).
20. Maki Y., Hirose H. Infectious Disease Spread Analysis Using Stochastic Differential Equations for SIR Model, *2013 4th International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation*, IEEE, 2013, pp. 152-156. doi: 10.1109/ISMS.2013.13
21. Simha A., Prasad R.V., Narayana S. A simple Stochastic SIR model for COVID-19 Infection Dynamics for Karnataka after interventions – Learning from European Trends, arXiv:2003.11920v3 [q-bio.PE] 16 Apr 2020. doi: 10.48550/ARXIV.2003.11920
22. Rao F. Dynamics Analysis of a Stochastic SIR Epidemic Model, *Abstract and Applied Analysis*, 2014 (SI01), pp. 1-9. doi: 10.1155/2014/356013
23. Wilkie J. Numerical methods for stochastic differential equations, *Physical Review E*, 2004, vol. 70, no. 1, pp. 017701. doi: 10.1103/PhysRevE.70.017701
24. Bayram M., Partal T., Buyukoz G.O. Numerical methods for simulation of stochastic differential equations, *Advances in Difference Equations*, 2018, vol. 2018, no. 1, pp. 17. doi: 10.1186/s13662-018-1466-5
25. <https://digital.gov.ru/ru/documents/6294> (accessed 20 October 2022).
26. Ivashov A. SMATH Studio. URL: <https://ru.smath.com/> (accessed 20 October 2022).
27. Boldog P., Tekeli T., Vizi Z., Dénes A., Bartha F.A., Röst G. Risk Assessment of Novel Coronavirus COVID-19 Outbreaks Outside China, *Journal of Clinical Medicine*, 2020, vol. 9, no. 2, pp. 571. doi: 10.3390/jcm9020571

Anwendung des stochastischen SIR-Modells zur Simulation des epidemischen Prozesses

Zusammenfassung: Es ist eine Simulation der Entwicklung des Epidemieprozesses unter Verwendung des stochastischen Kompartimentmodells SIR (Kermack-McKendrick-Modell) gezeigt. Das mathematische Modell des Prozesses wird als System stochastischer Differentialgleichungen dargestellt. Es ist die Möglichkeit der praktischen Anwendung des Programms SMath Studio zur Lösung des Systems stochastischer Differentialgleichungen des mathematischen Modells mit der Euler-Maruyama-Methode betrachtet. Die Ergebnisse numerischer Experimente sind vorgestellt.

Application du modèle SIR stochastique pour modélisation du processus épidémique

Résumé: Est montrée la modélisation du développement du processus épidémique à l'aide du modèle de compartiment stochastique SIR (modèle de Ker-Mac-McKendrick). Le modèle mathématique du processus est représenté sous la forme d'un système d'équations différentielles stochastiques. Est examinée l'application pratique du logiciel SMath Studio pour résoudre le système d'équations différentielles stochastiques d'un modèle mathématique à l'aide de la méthode Euler-Maruyama. Sont cités les résultats des expériences numériques.

Авторы: *Борисенко Андрей Борисович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; *Немтинов Владимир Алексеевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия; *Борисенко Антон Андреевич* – студент, ФГБОУ ВО «Северо-Западный государственный медицинский университет им. И. И. Мечникова», Санкт-Петербург, Россия.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ СКРЫТЫХ ОБЪЕКТОВ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКИ МЕНЯЮЩЕГОСЯ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ ПОЧВЫ

М. Е. Семенов¹, Ж. Б. Холмуродов², В. С. Ножкин³

*Кафедра цифровых технологий,
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» (1), Воронеж, Россия;
кафедры: «Теоретическая гидрометеорология» (2),
«Гидрометеорологическое обеспечение» (3), nozhkin-v@list.ru,
ФГКВБОУ ВО «ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия
им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Воронеж, Россия*

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат; влагосодержание в почве; гистерезис; заглубленные объекты; преобразователь Прейсаха.

Аннотация: Представлен подход к развитию методов инфракрасной диагностики скрытых в почве объектов с учетом динамически меняющегося влагосодержания. Идентификация скрытых объектов строилась на основе решения задачи теплопроводности в трехмерном пространстве с учетом тепловых аномалий, создаваемых скрытыми объектами. При этом предложенная модель позволяет учитывать динамически меняющиеся показатели влагосодержания почвы. В свою очередь, для моделирования проникновения влаги в почву использовалась компиляция классического закона Дарси и гистерезисной модели, основанной на преобразователе Прейсаха. Основные результаты работы получены в рамках имитационного моделирования. В частности, установлено, что повышение влагосодержания в почве способствует увеличению контраста в ИК-изображениях скрытых объектов.

Обозначения

A, B, C – параметры уравнения;

c – удельная теплоемкость;

$D(t)$ – интенсивность дренажа под почвенный слой;

$E(t)$ – интенсивность испарения, возникающая за счет корней растений, находящихся в почвенном слое;

$E_T(t)$ – интенсивность испарения и транспирации;

Θ – входной параметр оператора Прейсаха с переменным состоянием $\eta(t)$;

$f(t, x)$ – непрерывно дифференцируемая функция по переменным t и x ;

$g(t)$ – непрерывно дифференцируемая функция, кроме точек $T = \{\tau_i\}$, в которых определены и ограничены значения $g(\tau_i - 0)$, $g(\tau_i + 0)$, $g'(\tau_i - 0)$, $g'(\tau_i + 0)$, но $g(t)$ или $g'(t)$ могут иметь ограничен-

ные разрывы в τ_i ; также следует сделать предположение о том, что любой ограниченный интервал содержит конечное число точек τ_i ;

$I(t)$ – интенсивность проникновения влаги в почву;

k – теплопроводность;

L – толщина слоя почвы;

$Q(t)$ – интенсивность наблюдаемых осадков;

Q_s – мощность внешнего источника тепла;

q_{net} – поверхностный тепловой поток;

q_{sun} – поглощение почвой солнечного излучения;

q_{sky} – поглощение почвой атмосферного излучения;

q_{conv} – конвекция между почвой и воздухом;	$\alpha = k / c\rho$ – температуропроводность твердого тела;
q_{emis} – тепловое излучение почвы;	γ – параметр, характеризующий точки полуплоскости $P_{\alpha,\beta}$;
T – температура;	$\theta(t)$ – удельное содержание воды (при условии $0 \leq \theta \leq 1$);
t – время;	ρ – плотность;
x_0 – начальное состояние преобразователя;	ψ – матричный потенциал.
x, y, z – координаты пространства;	

Введение

В настоящее время беспилотные летательные аппараты находят широкое применение во всех сферах человеческой деятельности, например, их используют при сборе информации о чрезвычайных ситуациях, обеспечении работы телекоммуникаций, проведении метеорологических измерений, экологического мониторинга, поиска глубинных объектов, а также при доставке грузов и т.п. При этом обнаружение и распознавание наземных объектов является сложной задачей, однако труднее найти и распознать объекты, скрытые под земной поверхностью, в частности мины, заглубленные убежища и т.д. Все это связано со сложными процессами, происходящими как на земной поверхности, так и в ней. Наиболее часто применяемый метод поиска заглубленных объектов – инфракрасный (ИК). Он основывается на контрасте температур фона (земной поверхности) и самого заглубленного объекта. Кроме того, в работах [1 – 5] показано, что глубина укрытия, влажность грунта, свойства грунта и окружающей среды влияют как на максимальную разность поверхностных температур, развивающуюся над заглубленным объектом, так и на отставание по фазе, связанное с появлением горячего или холодного пятна внутри грунта. Также установлено, что максимальной глубиной определения небольших объектов, например, противотанковых и противопехотных мин составляет 17,5 и 5,6 см соответственно. Более того, в работах [4 – 7] отмечено, что содержание влаги в грунте оказывает существенное влияние на нагрев элементов, спрятанных в нем, и распределение тепла внутри него. При этом глубина обнаружения увеличивается. Поэтому формализация и учет влагосодержания почвы представляется естественным развитием методов ИК-диагностики скрытых объектов.

Цель статьи – установление зависимости глубины обнаружения объекта в почве от ее увлажненности на основе экспериментальных и теоретических данных.

Постановка задачи

Рассмотрим трехмерное пространство почвы, в которую помещен скрытый объект. На температуру поверхности влияет множество факторов, таких как тип почвы, глубина залегания объекта, тепловая мощность, коэффициент излучения почвы, ее влажность, а также скорость ветра. Кроме того, будем считать, что и грунт, и заглубленный предмет однородны. На **первом** этапе исследования проведем имитационное моделирование в случае, когда влажность грунта не изменяется при нагревании и охлаждении. Математическое описание эксперимента выглядит следующим образом. Согласно теории теплопроводности, распределение температуры $T(x, y, z, t)$ удовлетворяет следующему уравнению с естественными начальными и граничными условиями:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha(x, y, z) \nabla^2 T. \quad (1)$$

Таблица 1

Тепловые параметры используемых материалов в ходе эксперимента

Материал	Электропроводность	Удельная теплоемкость	Плотность
Сухой песок	0,26	800	1400
Песок влажностью 10 %	1,08	1025	1500
Алюминиевый блок	167	896	2800

Начальные и граничные условия:

$$T(0, x, y, z) = T_0(x, y, z); \quad T(t, x, y, z)|_{\Gamma} = T_{\Gamma}(x, y, z).$$

Оценка начального распределения температуры получается путем интерполяции с использованием значений температуры почвы в данном месте. Температура почвы меняется в зависимости от глубины и внешних условий. При достижении определенной глубины можно считать, что на температуру больше не влияет внешний тепловой поток или заглубленные предметы. Согласно экспериментальным наблюдениям установлено, что при глубине почвы 50 см температуру почвы можно считать постоянной, что представляет собой так называемый слой постоянной температуры. Таким образом, только верхняя поверхность подвергается воздействию воздуха, тепловой поток поверхности почвы определяет количество поглощаемой теплоты

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = q_{\text{net}}. \quad (2)$$

Вертикальная граница адиабатическая, то есть роль заглубления на вертикальной границе незначительна,

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0. \quad (3)$$

Поверхностный тепловой поток q_{net} определяется уравнением

$$q_{\text{net}} = q_{\text{sun}} + q_{\text{sky}} + q_{\text{conv}} - q_{\text{emis}} + Q_s. \quad (4)$$

Параметры материала, используемого в ходе экспериментальной части, приведены в табл. 1.

Имитационное моделирование

Полагаем, что в грунт (сухой песок) помещен объект (алюминиевый блок). В рамках вычислительного эксперимента измеряемая температура воздуха принималась за температуру окружающей среды, а измеренный коэффициент излучения поверхности почвы в равновесном состоянии – эталон излучения окружающей среды на почву. Температура нижней поверхности задавалась постоянной 20 °С, а периферии – адиабатической. Затем в течение 15 мин модельного времени участок почвы равномерно нагревался и остывал естественным образом. Тепловой контраст объекта с фоном количественно определялся на основе разницы средних температур поверхности почвы над объектом и почвы снаружи и вокруг объекта.

Результаты проведенного имитационного моделирования показали, что температура поверхности почвы повышается по мере ее нагрева и снижается при прекращении. Наличие объекта затрудняет теплообмен грунта, из-за чего температура поверхности почвы над объектом повышается быстрее, чем окружающая его почва, и медленнее падает. Контраст температуры поверхности непрерывно увеличивается, достигая пика при $t = 1440$ с.

Очевидно, что теплообмен требует времени, что вызывает задержку времени максимальной разницы температур по сравнению со временем максимальной температуры на поверхности почвы.

На рисунке 1 показано распределение температуры в сухом песке на его поверхности и по глубине почвы на временном интервале $t = 900$ с.

Очевидно, что температура поверхности непосредственно над объектом выше, чем в окружающей местности. Когда разница температур находится в пределах возможностей камеры, ее можно обнаружить. Из-за наличия объекта профиль температуры больше не является равномерным градиентным распределением. Наличие объекта в грунте сильно повлияло на температуру почвы, то есть затруднило изменение температуры почвы, что привело к более быстрому прогреву и более медленному охлаждению поверхности над ней.

Установлено, что изменение перепада температур на поверхности почвы соответствует разной глубине залегания объекта. Чем глубже глубина залегания объекта, тем больше контраст. При глубине в 10 мм разница температур составила $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 20 мм – $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 30 мм – разница намного меньше.

Очевидным остается тот факт, что тенденция контраста температуры поверхности между заглубленными объектами будет совершенно противоположна. Это связано с различными коэффициентами теплопроводности. Так, например, тротилловая шашка будет препятствовать передаче тепла вниз к грунту при нагреве, что приводит к большей температуре над ней, чем вокруг нее. Однако алюминий имеет лучшую теплопроводность, что может ускорить нисходящую теплопередачу почвы во время нагрева, так что температура поверхности алюминиевого блока ниже, чем его окружающая среда.

На основе этого факта можно легко идентифицировать и различать разные захороненные объекты по их конкретным характеристикам температуры поверхности. Это позволит улучшить вероятность обнаружения и снизить частоту ложных целей в процессе обнаружения заглубленных объектов в будущем.

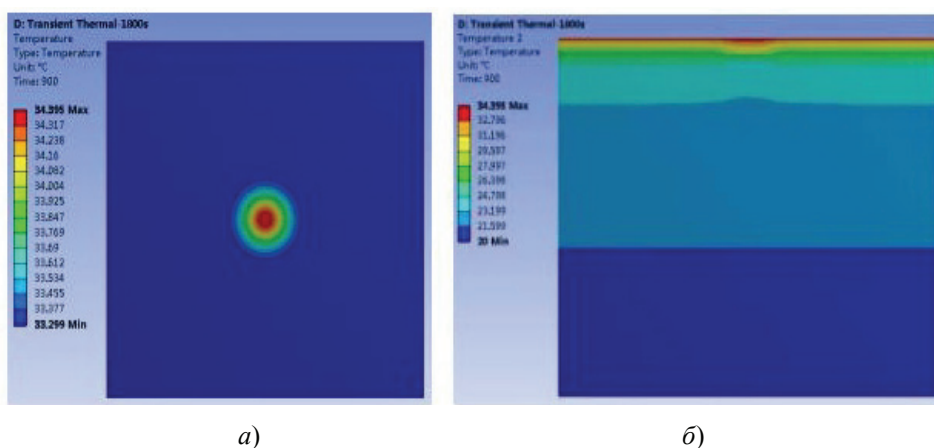


Рис. 1. Распределение температуры в сухом песке на его поверхности (а) и по глубине (б) при $t = 900$ с

Основываясь на приведенном анализе, можно найти лучший способ обнаружения заглубленного объекта в соответствии с различными характеристиками фона цели. Для очевидного случая цель-фон можно определить момент, когда температурный контраст поверхности достигает максимума, который может быть непосредственно обнаружен ИК-камерой. Это время будем считать лучшим моментом обнаружения (или интервалом). Мультивременные данные изображения используются для фильтрации фоновых помех и выделения цели, что, в свою очередь, позволяет снизить частоту ложных срабатываний. В том случае, если максимальная разница температур поверхности выходит за пределы возможностей камеры, необходимо увеличить мощность или увеличить время нагрева, чтобы усилить температурный сигнал, или добавить принудительную конвекцию на этапе охлаждения, чтобы инвертировать сигнал температуры охлаждения, а затем обнаружить усиленный сигнал.

На **втором** этапе исследования проведено имитационное моделирование с влажным грунтом. Математическое описание эксперимента выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha(x, y, z, \theta(t)) \nabla^2 T; \\ L \frac{d}{dt} \theta(t) = I(t) - D(t) - E(t). \end{cases} \quad (5)$$

Начальные и граничные условия:

$$T(0, x, y, z) = T_0(x, y, z); \quad \theta(0) = \theta_0; \quad T(t, x, y, z)|_{\Gamma} = T_{\Gamma}(x, y, z).$$

В классическом законе Дарси правая часть данной модели определяется выражениями:

$$I(t) = \min \left\{ Q(t), \frac{\Psi(t)}{A} \right\}; \quad D(t) = \frac{1}{B} \left(\Psi + \frac{L}{2} \right); \quad E(t) = \frac{E_T(t)}{C}. \quad (6)$$

Физическое объяснение указанной модели основано на следующих предпосылках: проникновение влаги через сеть макропор происходит равномерно и занимает весь объем почвенного слоя. В момент, когда поступающие осадки больше не могут впитываться почвой, излишек уходит на поверхность слоя. Таким образом возникает «запруживание». В данной модели вариант закона Дарси представляет почвенное осушение или дренаж, а также матричные силы, удерживающие воду [8 – 10].

Однако эта модель не в полной мере описывает динамику влагосодержания, поскольку эксперименты показали наличие гистерезисной зависимости между матричным потенциалом и удельным содержанием воды. Чтобы учесть это свойство, зависимость между матричным потенциалом и удельным содержанием воды моделируется с помощью оператора Преисаха P .

Приведем краткое описание соответствующего преобразователя. Для этого рассмотрим двухпозиционное реле с пороговыми числами α и β ($\alpha < \beta$).

Пространством состояний неидеального реле является пара чисел $(0, 1)$. Связь между входом $u(t) \in C[0, T]$ и переменным выходом $x(t) \in \{0, 1\}$ устанавливается оператором $R[\alpha, \beta, x_0]$ [8 – 10]

$$x(t) = R[\alpha, \beta, x_0]u(t). \quad (7)$$

При этом начальное состояние x_0 должно удовлетворять следующим условиям: если $u(0) \leq \alpha$, то $x_0 = 0$; если $u(0) \geq \beta$, то $x_0 = 1$; если $\alpha < u(0) < \beta$, то $x_0 = 0$ или $x_0 = 1$.

Выход преобразователя $x(t)$ ($0 \leq t \leq T$) определяется следующим набором правил:

$$\begin{cases} 0, & \text{если } u(t) \leq \alpha, \\ 1, & \text{если } u(t) \geq \beta, \\ x_0, & \text{если } u(t) \in (\alpha, \beta) \text{ при всех } \tau \in [0, t], \\ x(t) = 0, & \text{если } u(t) \in (\alpha, \beta) \text{ и найдется такое} \\ & t_1 \in [0, t], \text{ что } u(t_1) = \alpha \text{ и } u(\tau) \in (\alpha, \beta) \text{ при всех } \tau \in (t_1, t], \\ 1, & \text{если } u(t) \in (\alpha, \beta) \text{ и найдется такое} \\ & t_1 \in [0, t], \text{ что } u(t_1) = \beta \text{ и } u(\tau) \in (\alpha, \beta) \text{ при всех } \tau \in (t_1, t]. \end{cases} \quad (8)$$

Динамику входных-выходных соответствий неидеального реле демонстрирует рис. 2.

Представленный преобразователь определен на пространстве непрерывных функций и является детерминированным и статическим. Детальное описание данного преобразователя, а также его свойств, приведено в [8 – 10].

Для описания реальных гистерезисных явлений обычно используется континуальный аналог преобразователя, состоящего из семейства неидеальных реле, соединенных параллельно. Впервые такой преобразователь введен Прейсахом [8 – 10] для описания ферромагнитного гистерезиса. На основе дальнейших исследований установлено, что указанная модель может использоваться для формализации гистерезисных звеньев и допускает имплементацию в модели высокого уровня.

Рассмотрим множество Ω_ψ скалярных функций $\omega(\alpha, \beta)$, заданных на полуплоскости $P_{\alpha, \beta} \equiv \{\alpha, \beta : \alpha < \beta\}$, и таких, что

$$\omega(\alpha, \beta) = \begin{cases} 0, & \text{если } \alpha + \beta > \psi(\beta - \alpha); \\ 1, & \text{если } \alpha + \beta \leq \psi(\beta - \alpha). \end{cases} \quad (9)$$

Множество Ω_ψ – пространство состояний преобразователя Прейсаха, где $\psi(v) \in \psi$. На рис. 3 представлен элемент данного множества.

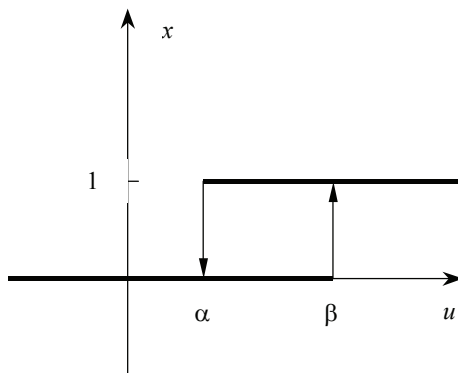


Рис. 2. Характеристика неидеального реле

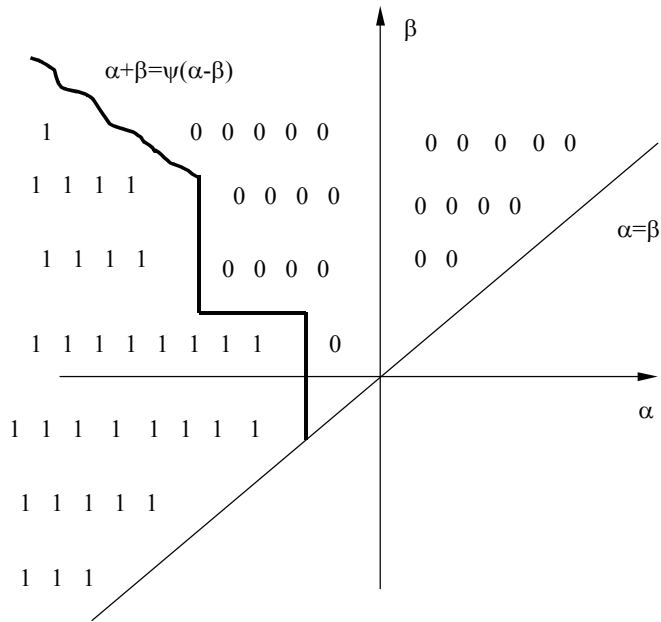


Рис. 3. Элемент множества Ω_ψ

Определим произвольный элемент $\omega_0(\alpha, \beta) \in \Omega_\psi$, который будем ассоциировать с начальным состоянием преобразователя Прейсаха. Все непрерывные на положительной полуоси функции $u(t)$ ($t \geq 0$), для которых верно следующее равенство $u(0) = \psi_0(0)$, где $\omega_0(\alpha, \beta)$ и $\psi_0(v)$, связаны соотношением (9) и являются классом допустимых входов для преобразователя Прейсаха, находящегося в соответствующем начальном состоянии.

При этом вход преобразователя Прейсаха устанавливается оператором Γ [8]

$$\omega(\alpha, \beta, t) = \Gamma [\omega_0] u(t) = R[\omega_0(\alpha, \beta), \alpha(\gamma), \beta(\gamma)] u(t). \quad (10)$$

Наряду с этим, выход преобразователя (Γ, ξ) определяется следующим соотношением:

$$\xi(t) = \int_{\alpha < \beta} \omega(\alpha, \beta, t) d\mu_{\alpha, \beta} = \mu_{\alpha, \beta}(\{\alpha, \beta\}: R[\omega_0(\alpha, \beta), \alpha, \beta] u(t) = 1). \quad (11)$$

Представленная гистерезисная модель лежит в основе гидрологической модели, описывающей проникновение и испарение влаги в почву. Исходя из этого, второе уравнение модели (5) примет вид:

$$\Theta = f(t, y(t)) + g(t) = F(t, E(t)); \quad y(t) = A[\eta(t)] E(t). \quad (12)$$

В песок с температурой 20°C и алюминиевым блоком добавили 600 г воды, температура которой равнялась 10°C . Исходя из условий температурного баланса, влажный песок стал иметь температуру $16,6^\circ\text{C}$, при этом периферия считалась адиабатической. Затем в течение 20 мин участок почвы равномерно нагревался и остывал естественным образом. Тепловой контраст объекта с фоном количественно определялся на основе разницы средней температуры поверхности почвы над объектом и средней температурой почвы снаружи и вокруг объекта.

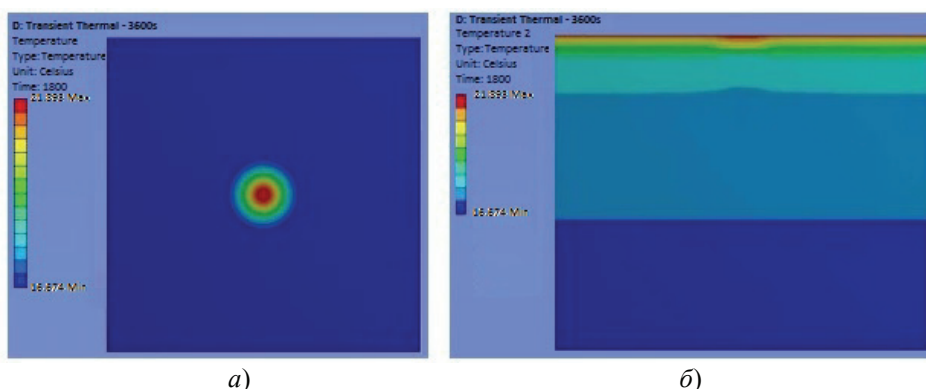


Рис. 4. Распределение температуры во влажном песке на его поверхности (а) и по глубине (б) при $t = 1800$ с

В отличие от результатов эксперимента с сухим песком, в мокром песке увеличилось время достижения пика нагрева $t = 2160$ с. Наличие объекта также затруднило теплообмен грунта, из-за чего поверхность почвы над объектом нагревалась быстрее, чем окружающая его почва, и медленнее падала.

На рисунке 4 показано распределение температуры поверхности и профиля почвы на временном интервале $t = 1800$ с. В отличие от результатов моделирования с сухим песком, при влажном песке увеличилось время его нагрева и максимальное значение температуры. Это связано с тем, что в силу теплового обмена равновесная температура в системе «вода – песок» оказалась ниже, чем в эксперименте с сухим песком (см. рис. 1). Кроме того, увлажненный песок повлиял на изменение перепада температур на поверхности почвы при разной глубине залегания объекта. В отличие от сухого песка, где разница температур в 4°C была достигнута на глубине 10 мм, такая же разница в мокром песке была на глубине 20 мм, минимальную же разницу удалось уловить на глубине 50 мм.

Эксперимент

Результаты имитационного моделирования послужили основой для проведения натурального эксперимента. Суть данного эксперимента заключалась в следующем: в ящик с песком массой 5 кг погружены 4 алюминиевых блока на глубины 10, 20, 30 и 35 мм соответственно. Над ящиком на высоте 2 м установлена лампа с возможностью изменения мощности нагрева. Выше лампы на высоте 4 м размещен тепловизор. Затем лампа включалась и нагревала песок в течение 15 мин, при этом регистрация нагрева песка проводилась тепловизором каждые 60 с. Временные ряды термограмм показаны на рис. 5.

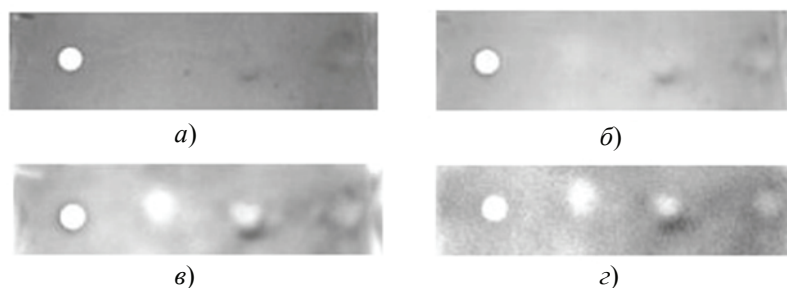


Рис. 5. Временные интервалы процесса нагрева-охлаждения сухого песка 1, 10, 15 и 20 минут (а – г соответственно)

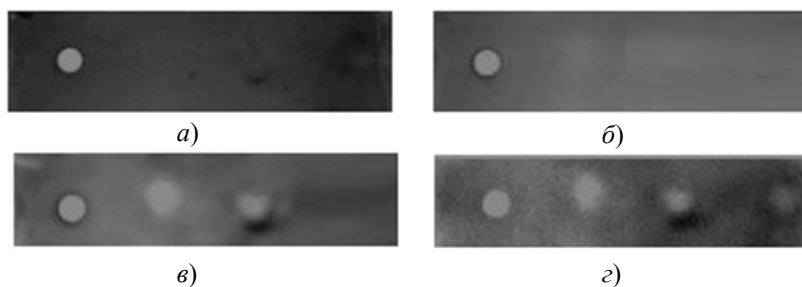


Рис. 6. Временные интервалы процесса нагрева-охлаждения влажного песка 10, 15, 20 и 25 минут (а – г соответственно)

Анализ временных термограмм свидетельствует, что в процессе нагрева и охлаждения температура поверхности над объектом отчетливо прослеживается. Кроме того, отчетливо просматривается температурный контраст за счет глубины залегания объекта. Также следует отметить, что разность температур поверхности достигает максимума после прекращения нагрева, при этом время запаздывания связано с глубиной залегания объекта, но мало связано со временем нагрева. Вероятность обнаружения можно повысить, обратившись к тренду разности температур поверхности и временному интервалу, в котором появляется контрастный пик.

В целях понимания, влияет ли влажность грунта на глубину определения заглубленного объекта, в песок добавим 600 г воды с температурой 10 °С и увеличим глубину залегания алюминиевых блоков на 10 мм, то есть теперь они залегают на 20, 30, 40 и 45 мм соответственно. Нагрев влажного песка ИК-лампой осуществлялся в течение 25 мин, регистрация показаний нагрева регистрировалась каждые 60 с. Временные ряды термограмм алюминиевых блоков во влажном песке показаны на рис. 6.

В отличие от временных термограмм сухого песка, за счет его увлажнения можно сделать следующие выводы: во-первых, промежуток времени, на котором отчетливо наблюдается нагретый объект, увеличился, скорее всего, это связано с большей влажностью, чем прежде; во-вторых, следует отметить, что влажный грунт повлиял на глубину распознавания заглубленного объекта.

Таким образом, проведенные эксперименты с сухим и влажным песком по обнаружению активного излучения в помещении подтвердили результаты имитационного моделирования.

Заключение

В работе предложен метод идентификации скрытых в почве объектов средствами ИК-диагностики с учетом динамически меняющегося влагосодержания земной поверхности. Указанный метод основывается на классических методах диагностики температурных контрастов, определяемых неоднородностями в сочетании с моделью динамически меняющегося влагосодержания в почве. Температурное поле строилось на основе решения прямой задачи теплопроводности в трехмерном пространстве. При этом влияние влагосодержания учитывалось параметрически и зависело от коэффициента теплопроводности и концентрации воды. В свою очередь, моделирование проникновения влаги основывалось на классическом законе Дарси и гистерезисной модели, базирующейся на преобразователе Прейсаха. Количественные показатели, полученные в рамках моделирования, свидетельствуют, что повышение влагосодержания в почве способствует увеличению контраста в ИК-изображениях скрытых объектов.

Список литературы

1. Kasban, H. A Comparative Study of Landmine Detection Techniques / H. Kasban, O. Zahran, M. Elaraby, M. El-Kordy, F. E. Abd El-Samie // *Sensing and Imaging*. – 2010. – Vol. 11, No. 3. – P. 89 – 112. doi:10.1007/s11220-010-0054-x
2. Esposito, S. Experimental Validation of an Active Thermal Landmine Detection Technique / S. Esposito, P. Fallavollita, M. Corcione, M. Balsi // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2014. – Vol. 52, No. 4. – P. 2020 – 2047. doi: 10.1109/TGRS.2013.2257798
3. Kaya, S. Buried and Surface Mine Detection from Thermal Image Time Series / S. Kaya, U. M. Leloglu // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. – 2017. – Vol. 10, No. 10. – P. 4544 – 4552. doi:10.1109/JSTARS.2016.2639037
4. Deans, J. Analysis of a Thermal Imaging Method for Landmine Detection, Using Infrared Heating of the Sand Surface / J. Deans, J. Gerhard, L. J. Carter // *Infrared Physics & Technology*. – 2006. – Vol. 48, No. 3. – P. 202 – 216. doi:10.1016/j.infrared.2005.06.003
5. Deans, J. An Analysis of a Thermal Imaging Method for Landmine Detection Using Microwave Heating / J. Deans, G. Schmithals, L. J. Carter // *Journal of Applied Geophysics*. – 2001. – Vol. 47, No.2. – P. 123 – 133. doi:10.1016/S0926-9851(01)00052-0
6. Zadorozhniy, V. G. Stochastic Model of Heat Transfer in the Atmospheric Surface Layer / V. G. Zadorozhniy, V. S. Nozhkin, M. E. Semenov, I. I. Ul'shin // *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. – 2020. – Vol. 60, No. 3. – P. 459 – 471. doi: 10.1134/S0965542520030173
7. Nozhkin, V. S. A Model of Advective Changes in Air Humidity: a Stochastic Approach / V. S. Nozhkin, V. G. Zadorozhniy, I. I. Ulshin, O. I. Kanishcheva // *International Journal of Engineering Systems Modelling and Simulation*. – 2020. – Vol. 11, No. 4. – P. 160 – 169. doi: 10.1504/IJESMS.2020.111273
8. Semenov, M. E. Oscillations under Hysteretic Conditions: from Simple Oscillator to Discrete Sine-Gordon Model / M. E. Semenov, O. O. Reshetova, A. V. Tolkachev, A. M. Solovyov, P. A. Meleshenko // In book: *Topics in Nonlinear Mechanics and Physics*. – 2019. – P. 229 – 253. doi:10.1007/978-981-13-9463-8_12
9. Borzunov, S. V. Hysteretic Converters with Stochastic Parameters / S. V. Borzunov, M. E. Semenov, N. I. Sel'vesyuk and P. A. Meleshenko // *Mathematical Models and Computer Simulations*. – 2020. – Vol. 12, No. 2. – P. 164 – 175. doi:10.1134/S2070048220020040
10. Semenov, M. E. Self-Oscillations in a System with Hysteresis: the Small Parameter Approach / M. E. Semenov, O. O. Reshetova, S. V. Borzunov, P. A. Meleshenko // *European Physical Journal Special Topics*. – 2021. – Vol. 230. – P. 3565 – 3571. doi:10.1140/epjs/s11734-021-00237-3

Identification of Hidden Objects in Conditions of Dynamically Changing Soil Moisture Content

M. E. Semenov¹, Zh. B. Kholmurodov², V. S. Nozhkin³

Department of Digital Technologies, Voronezh State University (1), Voronezh, Russia; Department of Theoretical Hydrometeorology (2), Department of Hydrometeorological Support (3), nozhkin-v@list.ru, Air Force Academy named Prof. N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin, Voronezh, Russia

Keywords: unmanned aerial vehicle; soil moisture content; hysteresis; buried objects; Preisach converter.

Abstract: The study is devoted to the development of methods for infrared diagnostics of objects hidden in the soil, taking into account dynamically changing moisture content. Identification of hidden objects was built on the basis of solving the problem of heat conduction in three-dimensional space, taking into account thermal anomalies created by hidden objects. At the same time, the proposed model makes it possible to take into account dynamically changing indicators of soil moisture content. In turn, to simulate the penetration of moisture into the soil, a compilation of the classical Darcy law and a hysteresis model based on Preisach transducers was used. The main results of the work were obtained in the framework of simulation modeling. In particular, it has been found that an increase in the moisture content in the soil contributes to an increase in the contrast in the IR images of hidden objects.

References

1. Kasban H., Zahran O., Elaraby M., El-Kordy M., Abd El-Samie F.E. A comparative study of landmine detection techniques, *Sensing and Imaging*, 2010, vol. 11, no. 3, pp. 89-112. doi:10.1007/s11220-010-0054-x
2. Esposito S., Fallavollita P., Corcione M., Balsi M. Experimental validation of an active thermal landmine detection technique, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, vol. 52, no. 4, pp. 2020-2047. doi: 10.1109/TGRS.2013.2257798
3. Kaya S., Leloglu U.M. Buried and surface mine detection from thermal image time series, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, vol. 10, no. 10, pp. 4544-4552. doi:10.1109/JSTARS.2016.2639037
4. Deans J., Gerhard J., Carter L.J. Analysis of a thermal imaging method for landmine detection, using infrared heating of the sand surface, *Infrared Physics & Technology*, 2006, vol. 48, no. 3, pp. 202-216. doi:10.1016/j.infrared.2005.06.003
5. Deans J., Schmithals G., Carter L.J. An analysis of a thermal imaging method for landmine detection using microwave heating, *Journal of Applied Geophysics*, 2001, vol. 47, no. 2, pp. 123-133. doi:10.1016/S0926-9851(01)00052-0
6. Zadorozhniy V.G., Nozhkin V.S., Semenov M.E., Ul'shin I.I. Stochastic model of heat transfer in the atmospheric surface layer, *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2020, vol. 60, no. 3, pp. 459-471, doi:10.1134/S0965542520030173
7. Nozhkin, V.S., Zadorozhniy V.G., Ul'shin I.I., Kanishcheva O.I. A model of advective changes in air humidity: a stochastic approach, *International Journal of Engineering Systems Modelling and Simulation*, 2020, vol. 11, no. 4, pp. 160-169. doi: 10.1504/IJESMS.2020.111273
8. Semenov M.E., Reshetova O.O., Tolkachev A.V., Solovyov A.M., Meleshenko P.A. Oscillations under hysteretic conditions: from simple oscillator to discrete Sine-Gordon model, *In book: Topics in Nonlinear Mechanics and Physics*, 2019, pp. 229-253. doi:10.1007/978-981-13-9463-8_12
9. Borzunov S.V., Semenov M.E., Sel'vesyuk N.I., Meleshenko P.A. Hysteretic Converters with Stochastic Parameters, *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2020, vol. 12, pp. 164-175. doi:10.1134/S2070048220020040
10. Semenov M.E., Reshetova O.O., Borzunov S.V., Meleshenko P.A. Self-oscillations in a system with hysteresis: the small parameter approach, *European Physical Journal Special Topics*, 2021, vol. 230, pp. 3565-3571. doi:10.1140/epjs/s11734-021-00237-3

Identifizierung von versteckten Objekten unter Bedingungen des sich dynamisch verändernden Bodenfeuchtegehalts

Zusammenfassung: Die Arbeit ist der Entwicklung von Methoden zur Infrarotdiagnostik von im Boden verborgenen Objekten unter Berücksichtigung dynamisch veränderlicher Feuchtigkeitsgehalte gewidmet. Die Identifizierung versteckter Objekte wurde auf der Grundlage der Lösung des Problems der Wärmeleitung im dreidimensionalen Raum unter Berücksichtigung der durch versteckte Objekte erzeugten thermischen Anomalien aufgebaut. Gleichzeitig ermöglicht das vorgeschlagene Modell die Berücksichtigung dynamisch veränderlicher Bodenfeuchteindikatoren. Um wiederum das Eindringen von Feuchtigkeit in den Boden zu simulieren, ist die Zusammenstellung des klassischen Darcy-Gesetzes und des auf Preissach-Konvertern basierenden Hysterese Modells verwendet. Die Hauptergebnisse der Arbeit sind im Rahmen der Simulationsmodellierung erzielt. Insbesondere ist festgestellt, dass die Erhöhung des Feuchtigkeitsgehalts im Boden zur Erhöhung des Kontrasts in den IR-Bildern von versteckten Objekten beiträgt.

Identification des objets cachés dans des conditions de changement dynamique de la teneur en humidité du sol

Résumé: L'article est consacré au développement des méthodes de diagnostic infrarouge des objets cachés dans le sol, en tenant compte de l'évolution dynamique de la rétention d'humidité. L'identification des objets cachés est basée sur la résolution de la conductivité thermique dans l'espace tridimensionnel, en tenant compte des anomalies thermiques générées par les objets cachés. Le modèle proposé permet de tenir compte de l'évolution dynamique de la teneur en humidité du sol. Une compilation de la loi classique de Darcy et du modèle d'hystérésis basé sur les transducteurs de Preisach est utilisée pour modéliser la pénétration de l'humidité dans le sol. Les principaux résultats sont obtenus dans le cadre de la simulation. En particulier, est constaté que l'augmentation de la teneur en humidité dans le sol contribue à augmenter le contraste dans les images infrarouges des objets cachés.

Авторы: *Семенов Михаил Евгеньевич* – доктор физико-математических наук, профессор кафедры цифровых технологий, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Воронеж, Россия; *Холмуродов Жамшид Бахриддинович* – адъюнкт кафедры теоретической гидрометеорологии; *Ножкин Владимир Сергеевич* – кандидат технических наук, преподаватель кафедры гидрометеорологического обеспечения, ФГКВОУ ВО «ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Воронеж, Россия.

ОБЩАЯ КОНЦЕПЦИЯ ПЕРЕДВИЖЕНИЯ ВО ВРЕМЕННЫХ СТРУКТУРАХ ИССЛЕДУЕМОГО ПАРАМЕТРА ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ

Е. И. Алгазин

*Кафедра «Электроника и электротехника», evgeniialgazin@gmail.com,
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»,
Новосибирск, Россия*

Ключевые слова: временные структуры; линейные системы автоматики; параметры цепи; электрическая цепь; элементная база.

Аннотация: Предложена идея перехода исследуемого параметра (напряжения на конденсаторе) из положительной области вещественной структуры времени через мнимую либо комплексную, а затем через мнимую в отрицательную (или положительную) область вещественной структуры времени. Такой переход можно осуществить путем поворотов и перемещений в структурах времени. Элементной базой для реализации данной идеи могут служить линейные системы автоматики.

Введение

Для определения состояния исследуемого параметра – напряжения на конденсаторе – линейной системы автоматики (ЛСА) во времени рассмотрены процессы генерации и диссипации энергии в данной системе в вещественной структуре временных соотношений. При этом в рассмотрении находилась одна вещественная структура времени [1].

В настоящей статье рассматривается переход из положительной области вещественной структуры времени в отрицательную (либо положительную) область этой структуры. Кроме того, во время такого перехода предполагается, что исследуемый параметр перемещается в мнимой либо комплексной, а затем мнимой структурах времени, и только затем переходит в нужную область вещественной структуры времени.

Такой алгоритм обработки исследуемого параметра ЛСА дает возможность переместиться этому параметру в любую область отрицательного (либо положительного) вещественного времени. При этом начало перемещения в положительной области вещественного времени может начинаться в любой точке.

Если в мнимой структуре времени (а также комплексной и мнимой) перемещений не будет, то поворот из положительной области вещественной структуры в мнимую структуру с последующим поворотом из мнимой (а также комплексной и мнимой) в отрицательную (либо положительную) область вещественной структуры даст значение времени, по модулю равное исходному, но с обратным знаком в отрицательной области вещественной структуры времени.

В настоящей работе использованы термины и понятия электротехники и теории функции комплексного переменного. Работа закладывает основы для совершенно нового и интересного способа передвижения исследуемого параметра цепей ЛСА в вещественной структуре за счет приведенного подхода.

Постановка задачи

Дана пилотная цепь ЛСА, состоящая из последовательно соединенных резистора с сопротивлением R , и конденсатора емкостью C . Конденсатор предварительно заряжен до напряжения U_0 . Источник питания отсутствует [2]. Получаем цепь $R - C - O - U_0$.

Также дана пилотная цепь ЛСА, состоящая из последовательно соединенных резистора с сопротивлением R , конденсатора емкостью C и катушки индуктивности L . Конденсатор предварительно заряжен до напряжения U_0 . Источник питания отсутствует. Получаем цепь $R - C - L - O - U_0$.

Кроме электрических цепей ЛСА дана механическая цепь ЛСА, состоящая из резервуара с поршнем, соединенным с пружиной жесткостью γ . На поршень действует сила трения с коэффициентом трения α . Поршень выталкивает сыпучий груз с начальной массой M_0 из резервуара [3].

В работе приняты следующие допущения:

- 1) все элементы цепи сосредоточенные и линейные;
- 2) существуют следующие временные структуры: вещественная t , комплексная $t + jt$ и мнимая jt .

Необходимо:

- 1) сформировать аналитические выражения исследуемого параметра во всех трех структурах;
- 2) описать поворот из структуры t в jt , перемещение во временной структуре jt и поворот из jt в $+t$ или $-t$;
- 3) описать поворот из структуры t в $t + jt$, перемещение во временной структуре $t + jt$ и перемещение во временной структуре jt , откуда происходит перемещение в структуру $\pm t$.

Варианты решения

Сформируем аналитические выражения исследуемого параметра во всех трех структурах, используя второй закон Кирхгофа.

1. Вещественная структура времени t

$$Ri_{CB} + \frac{1}{C} \int i_{CB} dt = 0,$$

где i_{CB} – свободная составляющая тока в пилотной цепи $R - C - O - U_0$,

$$i_{CB} = C \frac{du_{CB}}{dt};$$

u_{CB} – свободная составляющая напряжения на конденсаторе в пилотной цепи.

Подставим данное выражение в исходную формулу:

$$RC \frac{du_{CB}}{dt} + u_{CB} = 0, \quad u_{CB} = Ae^{pt}, \quad \frac{du_{CB}}{dt} = pAe^{pt},$$

где A – постоянная интегрирования; $p = (RC)^{-1}$.

Преобразуем полученную формулу

$$Ae^{pt} + RCpAe^{pt} = 0$$

и упростим выражение:

$$1 + RCp = 0, \quad p = (RC)^{-1}, \quad u_c = u_{c\text{CB}} = U_0 e^{-\frac{t}{RC}}.$$

2. Комплексная структура времени $t + jt$:

$$Ri_{\text{CB}} + \frac{1}{c} \int i_{\text{CB}} d(t + jt) = 0; \quad Ri_{\text{CB}} + \frac{1}{c} \int i_{\text{CB}} dt + j \frac{1}{c} \int i_{\text{CB}} dt = 0; \quad i_{\text{CB}} = C \frac{du_{\text{CB}}}{dt};$$

$$RC \frac{du_{\text{CB}}}{dt} + u_{\text{CB}} + ju_{\text{CB}} = 0; \quad u_{\text{CB}} = Ae^{pt}; \quad \frac{du_{\text{CB}}}{dt} = pAe^{pt}.$$

Преобразуем исходное уравнение

$$RCp u_{\text{CB}} + u_{\text{CB}} + ju_{\text{CB}} = 0$$

и упростим его

$$RCp + 1 + j = 0; \quad p = (1 + j)(RC)^{-1}.$$

Подставим в исходное уравнение

$$u_c = u_{\text{CB}} = U_0 e^{-\frac{1+j}{RC}t} = U_0 e^{-\frac{t}{RC}} e^{-j\frac{t}{RC}}.$$

3. Мнимая структура времени jt :

$$Ri_{\text{CB}} + \frac{1}{c} \int i_{\text{CB}} d(jt) = 0; \quad Ri_{\text{CB}} + j \frac{1}{c} \int i_{\text{CB}} dt = 0; \quad i_{\text{CB}} = C \frac{du_{\text{CB}}}{dt};$$

$$RC \frac{du_{\text{CB}}}{dt} + ju_{\text{CB}} = 0; \quad u_{\text{CB}} = Ae^{pt}; \quad \frac{du_{\text{CB}}}{dt} = pAe^{pt};$$

$$RCp u_{\text{CB}} + ju_{\text{CB}} = 0; \quad RCp + j = 0; \quad u_c = u_{\text{CB}} = U_0 e^{-j\frac{t}{RC}}.$$

Рассмотрим аналитические выражения исследуемого параметра для поворотов и перемещений в структурах времени t и jt (рис. 1 – 3):

1) поворот из положительной области вещественной структуры времени t в мнимую структуру jt (см. рис. 1, а)

$$u_c(jt) = \frac{U_0 e^{jt_0 p}}{U_0 e^{t_0 p}} U_0 e^{t_0 p} = U_0 e^{(jt_0 - t_0)p} e^{t_0 p} = U_0 e^{(jt_0 - t_0 + t_0)p} = U_0 e^{jt_0 p};$$

2) поворот и перемещение в структуре времени jt (см. рис. 1, б)

$$u_c(jt_k) = U_0 e^{j(t_0 + \Delta t)p} = U_0 e^{+j(t_0 + t_k - t_0)p} = U_0 e^{+jt_k p},$$

где $\Delta t = t_k - t_0$;

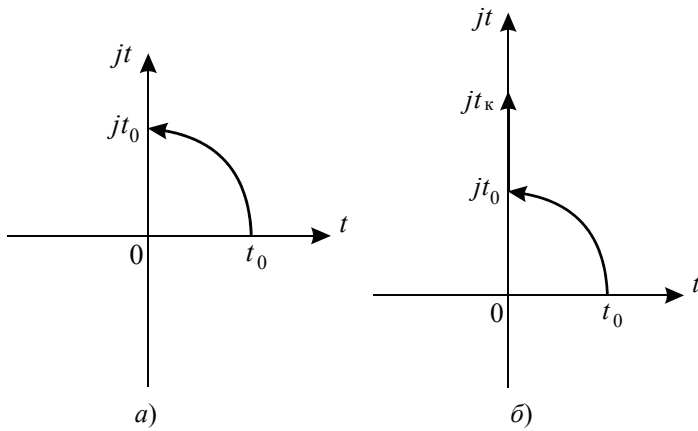


Рис. 1. Графическая иллюстрация поворота из положительной области вещественной структуры t в мнимую структуру jt (а), поворота и перемещения в структуре jt (б)

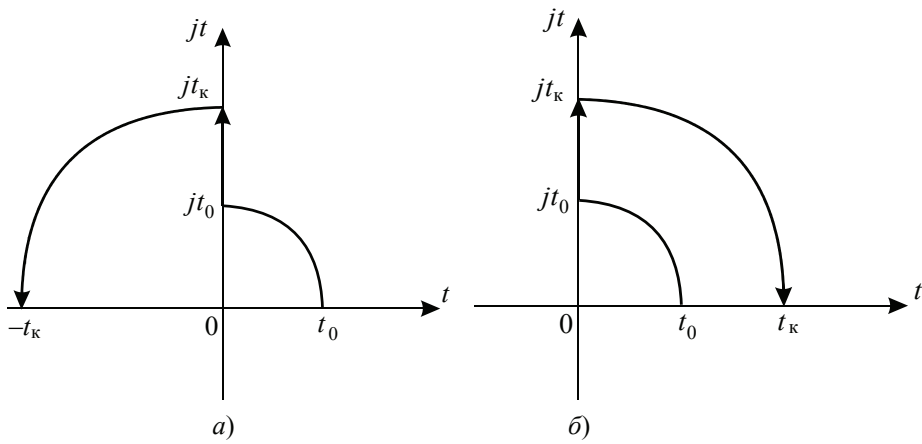


Рис. 2. Графическая иллюстрация переходов в отрицательную область вещественной структуры t (а), в положительную область вещественной структуры t (б)

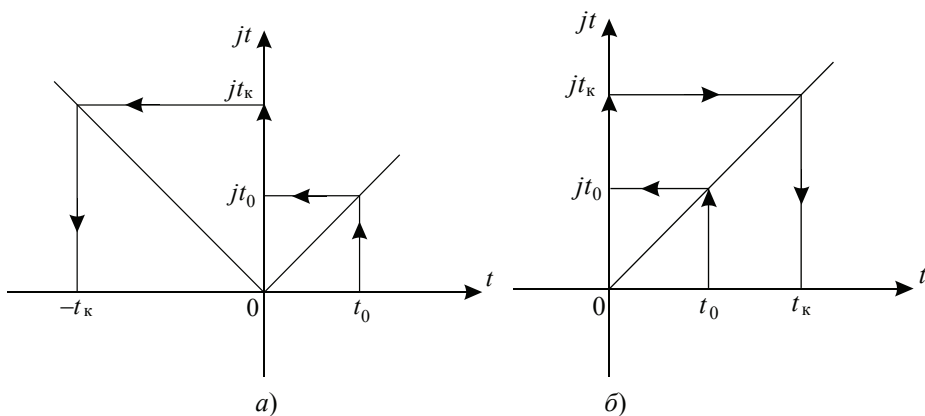


Рис. 3. Графическая иллюстрация ухода в отрицательную область вещественной структуры с использованием структуры $t + jt$ (а), в положительную область вещественной структуры с использованием структуры $t + jt$ (б)

3) переход в отрицательную область вещественной структуры времени t (см. рис. 2, а)

$$u_c(-t_k) = \frac{U_0 e^{t_k P}}{U_0 e^{j t_k P}} U_0 e^{j t_k P} = U_0 e^{(-t_k - j t_k) P} e^{j t_k P} = U_0 e^{(-t_k - j t_k + j t_k) P} = U_0 e^{-t_k P};$$

4) переход в положительную область вещественной структуры времени t (см. рис. 2, б)

$$u_c(t_k) = \frac{U_0 e^{t_k P}}{U_0 e^{j t_k P}} U_0 e^{j t_k P} = U_0 e^{(t_k - j t_k) P} e^{j t_k P} = U_0 e^{(t_k - j t_k + j t_k) P} = U_0 e^{t_k P};$$

5) уход в отрицательную область вещественной структуры времени t с использованием структуры $t + jt$ (см. рис. 3, а):

$$u_c(j t_k) = U_0 e^{j(t_0 + \Delta t) P} = U_0 e^{j(t_0 + t_k - t_0) P} = U_0 e^{j t_k P},$$

где $\Delta t = t_k - t_0$;

$$u_c(-t_k + j t_k) = U_0 e^{(-t_k + j t_k) P};$$

$$u_c(-t_k) = U_0 e^{-t_k P};$$

6) уход в положительную область вещественной структуры времени t с использованием структуры $t + jt$ (см. рис. 3, б):

$$u_c(j t_k) = U_0 e^{j(t_0 + \Delta t) P} = U_0 e^{j(t_0 + t_k - t_0) P} = U_0 e^{j t_k P};$$

$$u_c(t_k + j t_k) = U_0 e^{(t_k + j t_k) P};$$

$$u_c(t_k) = U_0 e^{t_k P}.$$

Рассмотрим пилотную цепь $R - C - L - O - U_0$.

В вещественной временной структуре t дифференциальное уравнение, описывающее режим функционирования такой цепи, имеет вид

$$\frac{d^2 u_{c \text{ CB}}}{dt^2} + \frac{R du_{c \text{ CB}}}{L dt} + \frac{1}{LC} u_{c \text{ CB}} = 0.$$

Характеристическое уравнение

$$p^2 + \frac{R}{L} p + \frac{1}{LC} = 0.$$

Его корни находятся следующим образом:

$$p_{1,2} = \frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}.$$

Исследуемый параметр описывается уравнением

$$u_{c \text{ CB}}(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t},$$

где A_1 и A_2 – постоянные интегрирования.

Для $R = 80$ Ом, $L = 0,010$ Гн, $C = 3 \cdot 10^{-5}$ Ф, $U_0 = 100$ В получаем следующие значения корней:

$$p_1 = -440; \quad p_2 = -7559,026084.$$

Ограничимся восемью членами разложения экспоненты в выражении $u_{c\text{св}}(t)$.

Получим следующее аналитическое выражение:

$$u_{c\text{св}}(t) = A_1 \left(1 + \frac{p_1 t}{1!} + \frac{p_1^2 t^2}{2!} + \dots + \frac{p_1^7 t^7}{7!} \right) + A_2 \left(1 + \frac{p_2 t}{1!} + \frac{p_2^2 t^2}{2!} + \dots + \frac{p_2^7 t^7}{7!} \right).$$

Подставим это выражение в дифференциальное уравнение. Получим степенное алгебраическое уравнение (САУ) седьмого порядка вида:

$$A_7 t^7 + A_6 t^6 + A_5 t^5 + \dots + A_1 t + A_0 = 0,$$

где $A_7 = 5,778 \cdot 10^{30}$, $A_6 = 9,172 \cdot 10^{28}$, $A_5 = 6,604 \cdot 10^{25}$, $A_4 = 0$, $A_3 = -8,192 \cdot 10^3$, $A_2 = 2,549 \cdot 10^{19}$, $A_1 = 0$, $A_0 = 4,768 \cdot 10^{-7}$.

С учетом заданных значений R, L, C, U_0 получим следующий набор корней САУ:

$$t_1 = -153,542 + j163,395; \quad t_2 = -153,542 - j163,395;$$

$$t_3 = -65,769; \quad t_4 = j7,312 \cdot 10^{12}; \quad t_5 = -j7,312 \cdot 10^{12};$$

$$t_6 = 186,427 - j183,835; \quad t_7 = 186,427 + j183,835.$$

В мнимой временной структуре jt дифференциальное уравнение, описывающее поведение исследуемого параметра, будет иметь следующий вид:

$$\frac{d^2 u_{c\text{св}}}{d(jt)^2} + \frac{R}{L} \frac{du_{c\text{св}}}{d(jt)} + \frac{1}{LC} u_{c\text{св}} = 0.$$

В конечном итоге, после преобразований получим

$$\frac{d^2 u_{c\text{св}}}{dt^2} + j \frac{R}{L} \frac{du_{c\text{св}}}{dt} - \frac{1}{LC} u_{c\text{св}} = 0.$$

Характеристическое уравнение примет вид

$$p^2 + j \frac{R}{L} p - \frac{1}{LC} = 0.$$

Для заданных номиналов элементов цепи имеем следующие корни:

$$p_1 = -j440,9739; \quad p_2 = -j7559,026084.$$

В структуре jt аналитическое выражение для $u_{c\text{св}}$ с учетом разложения экспоненты восемью членами будет иметь следующий вид:

$$u_{c\text{св}} = A_1 \left(1 + \frac{jp_1 t}{1!} - \frac{p_1^2 t^2}{2!} - \frac{jp_1^3 t^3}{3!} + \frac{jp_1^4 t^4}{4!} + \frac{jp_1^5 t^5}{5!} - \frac{jp_1^6 t^6}{6!} - \frac{jp_1^7 t^7}{7!} \right) + A_2 \left(1 + \frac{jp_2 t}{1!} - \frac{p_2^2 t^2}{2!} - \frac{jp_2^3 t^3}{3!} + \frac{jp_2^4 t^4}{4!} + \frac{jp_2^5 t^5}{5!} - \frac{jp_2^6 t^6}{6!} - \frac{jp_2^7 t^7}{7!} \right).$$

Подставив это выражение в дифференциальное уравнение для структуры jt , получим следующее САУ:

$$B_7 t^7 + B_6 t^6 + B_5 t^5 + \dots + B_1 t + B_0 = 0,$$

где $B_7 = 5,778 \cdot 10^{30}$, $B_6 = -9,172 \cdot 10^{28}$, $B_5 = -7,956 \cdot 10^{25}$, $B_4 = -9,631 \cdot 10^{22}$,
 $B_3 = -5,096 \cdot 10^{19}$, $B_2 = -2,549 \cdot 10^{19}$, $B_1 = -5,333 \cdot 10^{12}$, $B_0 = -6,667 \cdot 10^8$.

С учетом заданных значений R, L, C, U_0 получим набор корней САУ:

$$t_1 = -3,999 \cdot 10^3 - j1,995 \cdot 10^5; \quad t_2 = -3,999 \cdot 10^3 + j1,995 \cdot 10^5;$$

$$t_3 = -186,37 + j165,324; \quad t_4 = -186,37 - j165,324; \quad t_5 = 59,491;$$

$$t_6 = 155,625 - j192,784; \quad t_7 = 155,625 + j192,784.$$

Рассмотрим механическую линейную систему автоматике. Она представлена структурной схемой, изображенной на рис. 4.

В вещественной временной структуре t дифференциальное уравнение, описывающее поведение механической ЛСА, имеет вид

$$M_0 \frac{d^2 x}{dt^2} + \alpha \frac{dx}{dt} + \gamma x = 0,$$

где M_0 – начальное значение массы в цилиндре механической ЛСА, примем $M_0 = 1$ кг; α – коэффициент трения поршня о стенки цилиндра; γ – жесткость пружины.

Характеристическое уравнение

$$p^2 + \frac{\alpha}{M_0} p + \frac{\gamma}{M_0} = 0.$$

Задав $\alpha = 10$ кг/с, $\gamma = 5$ кг/с², $M_0 = 1$ кг, $X_0 = 10$ м, где X_0 – начальное отклонение поршня, получим:

$$p_1 = -0,527; \quad p_2 = -9,4721.$$

В мнимой временной структуре jt дифференциальное уравнение примет следующий вид:

$$M_0 \frac{d^2 x}{dt^2} + j\alpha \frac{dx}{dt} - \gamma x = 0.$$

Для заданных номиналов параметров механической ЛСА корни равны:

$$p_1 = -j0,527; \quad p_2 = -j9,4721.$$

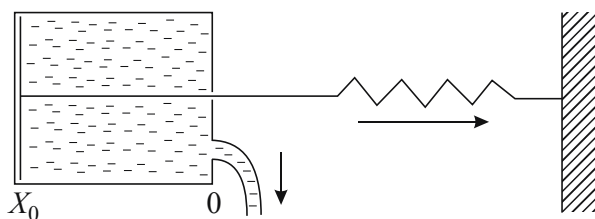


Рис. 4. Структурная схема механической линейной системы автоматике

Дальнейший ход вычислений аналогичен вычислениям для ЛСА вида $R-C-L-O-U_0$ для структуры t . Получим следующие наборы коэффициентов САУ:

$$A_7 = 4,005 \cdot 10^3; \quad A_6 = 5,312 \cdot 10^4; \quad A_5 = 3,045 \cdot 10^4;$$

$$A_4 = 0; \quad A_3 = 0; \quad A_2 = 9,875 \cdot 10^3; \quad A_1 = 5,684 \cdot 10^{-14}; \quad A_0 = 2,132 \cdot 10^{-14}$$

и корней САУ:

$$t_1 = -1,333 + j6,806 \cdot 10^8; \quad t_2 = -1,333 - j6,806 \cdot 10^8;$$

$$t_3 = -1,072 + j0,699; \quad t_4 = -1,072 - j0,699; \quad t_5 = -0,079;$$

$$t_6 = 1,112 + j1,378; \quad t_7 = 1,112 - j1,378.$$

Также аналогично ЛСА вида $R-C-L-O-U_0$ для структуры jt . Получим набор коэффициентов САУ:

$$B_7 = 4,005 \cdot 10^3; \quad B_6 = -5,312 \cdot 10^4; \quad B_5 = -3,685 \cdot 10^4; \quad B_4 = -3,552 \cdot 10^4;$$

$$B_3 = -1,5 \cdot 10^4; \quad B_2 = -9,875 \cdot 10^3; \quad B_1 = -1 \cdot 10^3; \quad B_0 = -100$$

и корни САУ:

$$t_1 = -4,318 - j8,033; \quad t_2 = -4,318 + j8,033;$$

$$t_3 = -1,03 + j1,19; \quad t_4 = -1,03 - j1,19; \quad t_5 = 0,072;$$

$$t_6 = 0,313 + j1,618; \quad t_7 = 0,313 - j1,618.$$

Для электрической и механической цепей ЛСА второго порядка корни p_1 и p_2 несут информацию о базовом состоянии цепи и режиме функционирования цепи в базовом состоянии.

Для цепи второго порядка в структуре jt корни чисто мнимые как в электрической ЛСА, так и механической ЛСА. Поэтому исследуемый параметр не затухает.

Переход в положительную область вещественной структуры t осуществляется путем перехода из структуры t в jt , перемещением в jt с последующим переходом в структуру t

$$K_{t \rightarrow jt} = \frac{\sum_{i=1}^N B_i e^{p_{B_i} jt}}{\sum_{i=1}^N A_i e^{p_{A_i} t}},$$

где $K_{t \rightarrow jt}$ – коэффициент такого перехода; B_i – i -я постоянная интегрирования для структуры jt ; A_i – i -я постоянная интегрирования для структуры t ; p_{B_i} – i -й корень для структуры jt ; p_{A_i} – i -й корень для структуры t ;

$$u_c(jt) = \sum_{i=1}^N A_i e^{p_{A_i} t} K_{t \rightarrow jt}.$$

Переход из jt в t осуществляется следующим образом:

$$K_{jt \rightarrow t} = \frac{\sum_{i=1}^N A_i e^{p_{A_i} t}}{\sum_{i=1}^N B_i e^{p_{B_i} t}},$$

где $K_{jt \rightarrow t}$ – коэффициент такого перехода;

$$u_c(t) = \sum_{i=1}^N B_i e^{p_{B_i} t} K_{jt \rightarrow t}.$$

Переход в отрицательную область вещественной структуры t осуществляется следующим образом: формируем степенное алгебраическое уравнение N -го порядка (в работе выбрано $N=7$). Находим корни степенного алгебраического уравнения t_i , $i = 1, \dots, N$. Определяем корни вида $p_i = -1/t_i$ для представления исследуемого параметра. Из всех слагаемых представления исследуемого параметра оставляем в рассмотрении только те, у которых положительная действительная часть. Такие слагаемые обеспечивают расхождение исследуемого параметра – это переход в отрицательную область вещественной структуры t , так как существует тождество $-p_i t = p_i(-t)$. Увеличение порядка САУ за счет увеличения числа слагаемых разложения экспоненты больше, чем порядок исходной цепи ЛСА, и ведет к появлению комплексно-сопряженных корней представления исследуемого параметра с положительной действительной частью.

Исследуемый параметр $x(t)$, имеющий размерность длины, пропорционален объему цилиндра с находящимся в нем поршнем, который выталкивает сыпучий груз, следовательно, он пропорционален массе этого груза.

Перевод $x(t)$ и, как следствие, массы сыпучего груза из структуры t в структуру jt реализуется аналогично такому переводу $u_{c_{св}}(t)$ в электрической линейной системе автоматики. Таким же образом осуществляется перевод исследуемого параметра из структуры jt в структуру t .

Результаты

В ходе проведенных исследований получены следующие результаты.

1. Проведен строгий вывод аналитических выражений исследуемого параметра в структурах t , $t + jt$ и jt .
2. Проведена графическая иллюстрация перехода из положительной области структуры t в структуру jt и затем в отрицательную и положительную области структуры t .
3. Проведена графическая иллюстрация перехода из положительной области структуры t в структуру $t + jt$ и затем в отрицательную и положительную области структуры t .
4. Сформировано аналитическое описание графической иллюстрации таких переходов.
5. Предложено увеличивать порядок САУ расчетным путем в целях обеспечения перехода исследуемого параметра электрической ЛСА и механической ЛСА в отрицательную область вещественной структуры t при порядке обоих ЛСА, равном двум.
6. Предложено переводить исследуемый параметр электрической ЛСА и механической ЛСА в положительную область вещественной структуры t путем перехода из структуры t в структуру jt , перемещения в jt и обратного перехода из структуры jt в структуру t при порядке обоих ЛСА, равном двум.

Выводы

1. Предложенные способы передвижения из структуры t в положительную и отрицательную области структуры t с использованием структур jt и $t + jt$ дает возможность заменить передвижение в структуре t и структуре $-t$ композицией поворотов и передвижений.
2. Предложенный способ передвижения из одной структуры в другую позволяет использовать ЛСА для своей реализации.

Список литературы

1. Алгазин, Е. И. Описание состояния во времени линейных систем автоматики как следствия процессов накопления и диссипации энергии / Е. И. Алгазин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2021. – Т. 27, № 3. – С. 380 – 386. DOI: 10.17277/vestnik.2021.03.pp.380-386
2. Веселовский, О. Н. Основы электротехники и электротехнические устройства радиоприемной аппаратуры: учеб. для вузов / О. Н. Веселовский, Л. М. Браславский. – М. : Высшая школа, 1977. – 312 с.
3. Ландау, Л. Д. Механика. Том 1 /Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – Изд. 4-е, исправ. – М. : Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1988. – 216 с.

General Concept of Movement in Time Structures of the Studied Parameter of Linear Automation Systems

E. I. Algazin

*Department of Electronics and Electrical Engineering, evgeniialgazin@gmail.com,
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

Keywords: temporary structures; linear automation systems; circuit parameters; electrical circuit; element base.

Abstract: The idea of transition of the studied parameter (capacitor voltage) from the positive region of the real time structure through the imaginary or complex, and then through the imaginary to the negative (or positive) region of the real time structure is proposed. Such a transition can be carried out by means of rotations and movements in the structures of time. Linear automation systems can serve as an element base for the implementation of this idea.

References

1. Algazin Ye.I. [Description of the state in time of linear automation systems as a consequence of the processes of accumulation and dissipation of energy], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2021, vol. 27, no. 3, pp. 380-386. doi: 10.17277/vestnik.2020.03.pp.388-392 (In Russ., abstract in Eng.)
2. Veselovskiy O.N., Braslavskiy L.M. *Osnovy elektrotehniki i elektrotehnicheskkiye ustroystva radioelektronnoy apparatury: uchebnoye posobiye dlya vuzov* [Fundamentals of electrical engineering and electrical devices of electronic equipment: a textbook for high schools], Moscow: Vysshaya shkola, 1977, 312 p. (In Russ.)
3. Landau L.D., Lifshits Ye.M. *Mekhanika* [Mechanics], vol. 1, izd. 4-ye, isprav. Moscow: Nauka, Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1988. 216 p. (In Russ.)

Allgemeines Konzept der Bewegung in Zeitstrukturen des untersuchten Parameters der linearen Automatisierungssysteme

Zusammenfassung: Es ist die Idee des Übergangs des untersuchten Parameters (Kondensatorspannung) vom positiven Bereich der Echtzeitstruktur durch den imaginären oder komplexen und dann durch den imaginären in den negativen (oder positiven) Bereich der Echtzeitstruktur vorgeschlagen. Ein solcher Übergang kann durch Rotationen und Bewegungen in den Zeitstrukturen vollzogen werden. Lineare Automatisierungssysteme können als elementare Basis für die Umsetzung dieser Idee dienen.

Conception générale du mouvement dans les structures temporelles du paramètre étudié des systèmes d'automatisation linéaire

Résumé: Est proposée l'idée de la transition du paramètre étudié (tension aux bornes du condensateur) du domaine positif de la structure réelle du temps à travers l'imaginaire ou complexe, puis à travers l'imaginaire dans le domaine négatif (ou positif) de la structure réelle du temps. Une telle transition peut être réalisée par des tours et des mouvements dans les structures du temps. Des systèmes d'automatisation linéaires peuvent servir de base élémentaire pour la mise en œuvre de cette idée.

Автор: *Алгазин Евгений Игоревич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроника и электротехника», ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», Новосибирск, Россия.

ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ РЕГИОНАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКИ В ПРОБЛЕМЕ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

А. А. Баламутова, Н. С. Попов, А. В. Андреев

*Кафедра «Природопользование и защита окружающей среды»,
eco@mail.tstu.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: возмущения; диагностика неполадок; иерархическое управление; потери на обслуживание; устойчивое развитие; экономическая система.

Аннотация: Региональные экономические системы (РЭС) относятся к системам длительной эксплуатации, подверженным широкому кругу внутренних и внешних вызовов (возмущений). Дестабилизирующее их действие удается предотвратить с помощью типовой системы менеджмента. Однако в задачах управления устойчивым развитием РЭС неизбежно возникает необходимость в эволюции системы по причине перехода ее в предельные (климаксные) состояния, диагностика которых в системах менеджмента ранее не осознавалась как необходимая функция. В этой связи рассмотрены возможные способы обнаружения и диагностики таких состояний.

Введение

Региональные экономические системы (РЭС) как объекты управления представляют собой целостные территориальные образования, состоящие из промышленных, социальных и экологических подсистем, функционирующих в активном внешнем окружении под централизованным административным контролем. Они предназначены для эффективного производства товаров и услуг, подъема общественного благосостояния, оптимального перераспределения валового регионального продукта между производственной и социальной сферами, с учетом поддержания качественного состояния природных сред на рассматриваемой территории.

Региональные экономические системы относятся к категории открытых, целеустремленных и развивающихся макросистем, имеющих иерархическую структуру организации. Промышленные подсистемы демонстрируют динамичную, нелинейную и, в некотором смысле, хаотичную производственную среду, в которой отдельные виды ресурсов внезапно могут оказаться недоступными, из-за чего приходится вводить резервные ресурсы в случайные моменты времени, и где периодически возникает потребность в новых рабочих местах. Наличие социальной компоненты в РЭС делает их поведение зависимым от мотиваций социальных индивидов (элементов РЭС), что часто отражается на смене способов организации экономических систем.

Региональные экономические системы почти невозможно описать математически полно и детально, особенно это касается их экологических подсистем,

поэтому приходится искать компромисс между простотой описания отдельных звеньев (элементов, подсистем) и необходимостью учета важнейших поведенческих реакций всей системы. Разрешение данного компромисса достигается на основе иерархического многоуровневого описания.

Инфраструктурные объекты (**ИО**) являются основой социально-экономического развития РЭС. К ним относятся энергетические, транспортные, медицинские, телекоммуникационные, жилищно-коммунальные, образовательные и ряд других, от состояния которых зависит производительность труда в промышленных подсистемах и конкурентоспособность регионов во внешней социально-экономической среде. Инфраструктурные объекты относятся к категории сетевых организаций обслуживания населения различными видами производимых благ и, одновременно с этим, объединения всех вышеназванных типов подсистем в единое целое. Последнее обстоятельство улучшает стабильность РЭС и, в определенной мере, предсказуемость их поведения. В задачах управления цели развития РЭС и ИО должны быть согласованы. Это означает, что если P – универсальное цифровое множество целевых показателей развития РЭС, R – соответственно множество показателей ИО, тогда R является подмножеством множества P : $R \subseteq P$.

Жизненный цикл РЭС обычно ничем не ограничен и может составлять десятилетия, отчего экономические системы такого уровня автоматически оказываются объектами планирования и управления в проблеме регионального устойчивого развития по причине обязательного учета интересов людей, рождение которых ожидаемо через 20 и более лет. Пространственные границы РЭС могут расширяться в зависимости от выбранной стратегии развития региона.

Под *устойчивой экономической системой* понимают такую систему, «которая открыто стремится к сохранению всего ограниченного капитала, возобновляет отдельные элементы других видов природного капитала и(или) использует добавки к искусственному капиталу для замены истощающихся ресурсов других видов природного капитала» [1]. При этом контроль за устойчивостью должна выполнять система менеджмента.

В процессе экономической деятельности РЭС осуществляют расширенное воспроизводство своего потенциала и положения, то есть эволюционируют под действием разного рода вызовов (возмущений). В этой связи возникла новая модель развития экономических систем, а именно – эволюционная, в рамках которой «экономические процессы рассматриваются как спонтанные, открытые и необратимые; они порождены взаимодействием внешних и внутренних факторов и проявляются в изменении структуры экономики и действующих в ней агентов. Особое внимание уделяется процессу инноваций – появлению, закреплению и распространению нового; конкуренции как процессу отбора, а также проблемам информации, неопределенности, времени» [2]. В целеустремленных РЭС эволюция приобретает направленный характер вследствие работы систем административного управления.

В 1916 г. А. Файоль выразил смысл управления словами: «Управлять – значит предвидеть, организовывать, распоряжаться, координировать и контролировать» [3]. Интерпретация данного определения в парадигме системной экономики [4] позволяет рассматривать процесс управления в виде комбинаций последовательно-параллельных «элементарных» действий. По отношению ко времени управление РЭС заключается в достижении заданных значений показателей в интересные моменты времени. При этом реализуются следующие элементарные действия:

- задание (прогнозирование) целевых уровней показателей, достижение которых необходимо обеспечить в контрольные моменты времени;
- осуществление действий, способствующих достижению целевых уровней.

Здесь действия первого типа относятся к «планированию будущего состояния», второго – к «распоряжению». По отношению к пространственному измерению предметной сферы деятельности РЭС управление осуществляется с помощью специальной административно-организующей структуры, в которой формируются узловые элементы принятия решений, через которые реализуется основная цель управления. Такие действия ассоциируются с «организацией». При этом единство или интеграция предметной сферы достигается за счет «координации» действий всех агентов иерархической системы, а функция централизованного контроля отводится администраторам.

Математическая теория управления многоуровневыми иерархическими системами развивается с середины 60-х годов прошлого века. Особую известность получили работы М. Месаровича, Д. Мако и И. Такахары [5], где систематически исследуются математические модели иерархических структур управления и анализируются преимущества, которые может дать применение многоуровневого описания в практических случаях [6].

Известны три основных типа иерархических многоуровневых систем управления: 1) стратифицированные; 2) многослойные; 3) многоэшелонные.

Первый тип имеет дело с системой моделей, каждая из которых описывает поведение объекта управления с точки зрения выбранных исследователем уровней абстрагирования. Эти уровни именуется *стратами*. Для каждой из них существует ряд характерных особенностей (переменных, законов, принципов), с помощью которых и описывается поведение объекта. Нижним стратам даются более подробные и специфичные описания, чем находящимся над ними.

Второй тип иерархической организации относится к сложностям процессов принятия решений в условиях неопределенности. Для этого процессы принятия решений представляют в виде семейства последовательно соединенных более простых подпроблем таким образом, чтобы их решение позволило решить и исходную проблему. Функциональную иерархию принятия решений называют *многослойной системой управления*. В ее основе: 1 – выбор стратегии принятия решений; 2 – уменьшение неопределенности с помощью подходящих методов обучения; 3 – поиск допустимого способа действий, удовлетворяющего заданным ограничениям.

Третий тип организационной иерархии – многоэшелонный. Он допускает наличие конфликтов целей и задач при решении подпроблем и имеет ряд важных особенностей [5]: 1 – система состоит из семейства четко выделенных взаимодействующих подсистем; 2 – часть из этих подсистем является «решающими» элементами; 3 – принимающие решения элементы располагаются иерархически, то есть находятся под влиянием или управлением других решающих элементов.

Эффективность результатов работы многоуровневых систем зависит от двух базовых процессов: декомпозиции общей задачи на локальные задачи меньшей размерности и объединения их решений на основе выбранного принципа координации.

Поскольку РЭС являются характерными примерами организаций со сложной структурой, механизм принятия управленческих решений для них следует разрабатывать на основе теории иерархических многоуровневых систем. При этом необходимо учитывать тот факт, что время функционирования РЭС соответствует десятилетиям, а долгосрочные цели управления могут быть достигнуты только в результате перехода системы на траекторию устойчивого развития. В статье [7] содержится описание трехуровневой системы менеджмента устойчивого развития, основанной на идеях иерархических многоуровневых систем управления.

В процессе работы промышленных подсистем в них возникают отказы и повреждения оборудования, износ машин и механизмов, простои из-за нарушения

графиков поставок сырья и материалов, запаздывания и искажения в информационных и управляющих каналах, а также множество других событий, в результате которых технологическое оборудование из работоспособного состояния переходит в неработоспособное, предельное, опасное [8]. Вследствие этого менеджеры разрабатывают меры по повышению надежности РЭС и на их основе модернизируют подсистему и ее элементы.

Особое значение для РЭС представляют проблемные или «климаксные» ситуации, в которых система выходит на границу своих потенциальных возможностей и уже не способна продвигаться к намеченным целям устойчивого развития (ЦУР). Из таких ситуаций требуется переводить систему в нормальные целеустремленные состояния посредством их реструктуризации [9]. Но для этого необходимо диагностировать состояния РЭС либо с помощью специальных процедур, предусмотренных в системе управления, либо на основе проведения экспертных обследований.

Цель настоящей работы заключается в описании методов диагностики проблемных ситуаций, возникающих в процессе длительной эксплуатации инфраструктурных объектов РЭС.

Классификация и диагностика возмущений в промышленных подсистемах РЭС

Экономический прогресс в регионах РФ ассоциируется с ростом общественного благосостояния, увеличением производственных мощностей, расширением экспорта товаров и услуг, с применением систем цифрового технологического и административного управления. Вместе с тем укрупнение промышленных предприятий ведет к росту объемов потребления природных ресурсов и увеличению отходов производства, усложнению технологического оборудования, поиску новых логистических маршрутов и появлению непредвиденных нештатных ситуаций. В итоге с ростом производства, так или иначе, возрастают экономические и экологические потери.

Мировая практика анализа надежности производственных систем свидетельствует о необходимости разработки теоретических и прикладных методов раннего обнаружения нештатных ситуаций в целях снижения вероятности возникновения опасных остановок производства, повреждения оборудования и несчастных случаев с персоналом, а также улучшения обслуживания технологического оборудования [10]. Например, в 90 компаниях Швеции, представляющих ее обрабатывающую промышленность, производительность оборудования с 2006 по 2012 гг. в среднем составляла 51,5 %. В этой связи Ассоциация шведской машиностроительной промышленности продвигает концепцию планирования к 2030 г. производственных систем, свободных от действия возмущений. В основу концепции положена идея всеобъемлющей эффективности производства (Overall Equipment Effectiveness – ОЕЕ) [11]. Она реализуется на основе подхода «снизу-вверх», в котором все участники производства работают над устранением шести основных типов потерь, связанных: 1 – с отказом оборудования; 2 – сменой или корректировкой заданий; 3 – холостыми прогонами и кратковременными простоями; 4 – снижением темпов производства; 5 – уменьшением производительности; 6 – дефектами качества продукции. В 2014 г. Институт ОЕЕ предложил «Промышленный стандарт ОЕЕ» с рекомендациями о том, как определять потенциальные потери производства [12].

Своевременное выявление и идентификация возмущений имеют особый смысл для решения задач устойчивого развития, поскольку в процессе длительного времени работы РЭС промышленные и экологические подсистемы претерпе-

вают и такие воздействия, которые способны качественно (необратимо) изменять свои состояния.

Цели обнаружения и диагностики технологических возмущений состоят в следующем [10]:

- обнаружение зарождающейся неисправности;
- раннее выявление аномального состояния объекта;
- определение в реальном масштабе времени причин неудовлетворительной работы оборудования;
- предсказание негативных тенденций развития технологического процесса;
- выбор подходящего способа обнаружения нештатных ситуаций;
- диагностика причин появления неисправности после ее обнаружения.

Для задач устойчивого развития РЭС к вышеназванным необходимо добавить еще одну цель – диагностику проблемных (климаксных) состояний, устранение которых невозможно осуществить без реструктуризации объекта управления и(или) его системы административного контроля.

Под *возмущением* в литературе часто понимают слова, близкие по смыслу: «нарушение», «неполадка» и «неисправность». Согласно [11], производственными возмущениями (production disturbances) являются: «...дискретные или непрерывные, плановые или незапланированные нарушения или изменения, возникающие в течение рабочего времени и способные повлиять на доступность, производительность, качество продукции, безопасность, рабочие условия, окружающую среду и т.п.». Для экологических подсистем возмущением является: «...любое относительно дискретное событие во времени, которое разрушает экосистему, сообщество или структуру популяции, изменяет ресурсные резервы, доступность субстрата или физическую окружающую среду» [13].

Производственный и экологический мониторинги содействуют систематической работе над улучшением состояния ИО РЭС. Однако холистический подход к обнаружению, измерению и обращению с возмущениями возможен только в системах управления [14, 15]. В публикации [10] термины «нарушение» и «неполадка» рассматриваются как синонимы. Причем под нарушением понимается минимальное изменение эксплуатационных качеств, а под неисправностью – полная невозможность работы оборудования. Такой точки зрения будем придерживаться и в настоящей работе.

Диагностика проблемных состояний подсистем

На рисунке 1 изображен фрагмент потока событий, связанных с возникновением разного рода неполадок в промышленной подсистеме РЭС. Каждой неполадке соответствует определенное состояние подсистемы $h(t_i, x_{1i}, x_{2i}, x_{3i})$, где t_i – случайные моменты времени; x_{1i}, x_{2i}, x_{3i} – координаты траектории движения РЭС в многомерном пространстве экономических, экологических и социальных показателей соответственно.

На диаграмме отмечены диапазоны возможных состояний подсистемы: с неполадками (h_0, h_{\min}) & (h_{\max}, h_{ps}) ; нормального функционирования $[h_{\min}, h_{\max}]$; пороговые значения неисправных h_0 и проблемных h_{ps} ситуаций.

Неисправное или терминальное состояние оборудования h_0 обнаруживать несколько проще, чем выявлять неполадки. Успех во многом зависит от компетентности обслуживающего персонала. Однако в системах автоматизированного управления предприятием применяют математические методы диагностики, позволяющие обнаруживать также и зарождающиеся нарушения. В [10] методы диагностики разделены на две основные группы: 1 – оценивание переменных и параметров процессов; 2 – распознавание образов поведения процессов.

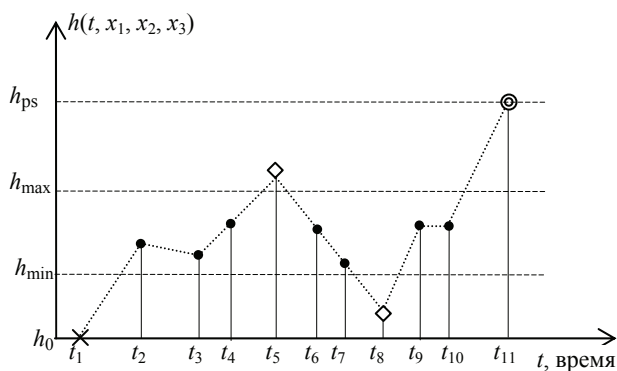


Рис. 1. Диаграмма дискретных состояний функционирования промышленной подсистемы:

- – нормальное состояние; ◇ – неполадка; × – неисправное (нерабочее) состояние;
- ⊙ – проблемное состояние; ... – промежуточные непрерывные состояния

Для задач устойчивого развития РЭС особенно важна диагностика состояний h_{ps} , методы определения которых на сегодня недостаточно развиты. Выход РЭС на h_{ps} побуждает менеджеров к реструктуризации (эволюции) экономической системы. Между h_0 и h_{ps} существуют многие другие состояния функционирования РЭС, которые можно охарактеризовать как «промежуточные».

Если любое из состояний $h_i \in (h_0, h_{ps})$ принимает в общей сложности k_i различных значений, каждое из которых имеет соответствующую вероятность появления p_{ij} , $j = \overline{1, k_i}$, тогда меру неопределенности состояния h_i можно оценить через энтропию [16]:

$$H_i = - \sum_{j=1}^{k_i} p_{ij} \ln p_{ij}. \quad (1)$$

Поскольку для всех $j = \overline{1, k_i}$ справедливо неравенство $0 \leq p_{ij} \leq 1$ с дробными значениями p_{ij} , H_i – неотрицательная величина. В особых случаях, когда h_0 или h_{ps} имеют вероятности появления $p_{ij} = 1$, для них величина $H_i = 0$, так как неопределенности в этих случаях нет и $\sum_{j=1}^{k_i} p_{ij} = 1$.

При равномерном законе появления h_i : $p_{ij} = 1/k_i$; $j = \overline{1, k_i}$ величина энтропии двух предельных состояний h_0 и h_{ps} соответствует графику на рис. 2. Максимальная энтропия равна 0,639. При увеличении k_i энтропия возрастает. Для равномерного закона распределения h_i энтропия вычисляется по формуле $\ln(k_i)$.

При равномерном законе появления h_i : $p_{ij} = 1/k_i$; $j = \overline{1, k_i}$ величина энтропии двух предельных состояний h_0 и h_{ps} соответствует графику на рис. 2. Максимальная энтропия равна 0,639. При увеличении k_i энтропия возрастает. Для равномерного закона распределения h_i энтропия вычисляется по формуле $\ln(k_i)$.

В [11] приведены результаты диагностирования неполадок на предприятиях обрабатывающей промышленности Швеции в 2001 и 2014 гг. Сведения о неполадках получены в системах промышленного мониторинга. В 2001 г. необходимую информацию предоставили 80 компаний, в 2014 г. – 71 компания. Названы типы 21 неполадки. Результаты оценок неполадок разных лет во многом

совпадали. Наибольшую долю в производственных потерях имеют неполадки в оборудовании, дефекты в программном обеспечении и медийные ошибки. Классификация неполадок по данным работы [11]:

- неполадки в работе оборудования;
- человеческий фактор;
- неполадка внешнего характера;
- дефекты в программном обеспечении промышленного оборудования;
- перепрограммирование;
- ошибка планирования;
- смена инструмента;
- время замены/заправки материала;
- настройки/установки на нуль;
- регулировка;
- профилактика;
- уборка;
- рабочие встречи;
- паузы или перерывы;
- временные задержки поставляемого продукта/материала;
- остановка выходного потока;
- нехватка персонала;
- медиаошибка;
- потеря скорости;
- брак или проблема с качеством продукта;
- инциденты/промахи.

При равновероятном возникновении указанных неполадок максимальная неопределенность производственных состояний оценивается величиной $H \cong 3$. Для уменьшения энтропии в процессе управления необходимо знать совместную плотность вероятности появления нарушений. Для этого требуется на длительном интервале времени работы оборудования накапливать информацию о нарушениях, используя известные методы их обнаружения и диагностики в системе оперативного управления производством. В функцию такой системы входит конкретизация задач на основе оперативной информации о состоянии промышленной подсистемы в целях уменьшения влияния возмущающих воздействий. В иерархии стратегических, тактических и оперативных задач с диагностикой возмущений последние находятся на самом нижнем (полевом) уровне [9]. Решения, вырабатываемые системой оперативного управления с диагностикой, в отличие от других, соответствуют не множеству возможных возмущений с определенной вероятностной мерой, а каждой возникающей реализации возмущения (неполадки).

Перечисленные неполадки соответствуют приведенному выше определению производственных возмущений. Неполадки не приводят к отказам промышленных подсистем. По терминологии теории надежности они должны рассматриваться как повреждения. Большинство неполадок легко диагностируется в системах мониторинга. Только в некоторых случаях может потребоваться специальное измерительное оборудование со своим программным обеспечением или аналитики по обнаружению ошибок, связанных с «человеческим фактором».

Неординарность появления в РЭС проблемных состояний заключается в том, что события такого рода относятся к разряду редких, связанных с действием качественно новых вызовов (возмущений), не актуальных на этапе планирования сис-

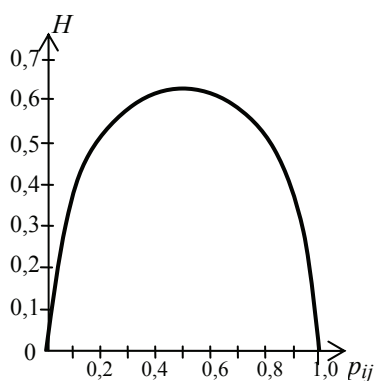


Рис. 2. Энтропия состояний h_0 и h_{ps} с вероятностями p_{ij} и $(1 - p_{ij})$

темы, но крайне важных с момента обнаружения h_{ps} . Во многих случаях обнаружение и диагностика h_{ps} предполагает длительную работу сети мониторинга [13].

Состояния h_0 и h_{ps} являются предельными, независимыми и несовместимыми. Они означают неработоспособные состояния подсистемы. Различие между ними, прежде всего, кроется в различии причин для их появления. В работе [10] приведены описания технологических дефектов, из-за которых часто возникают h_0 . Устранив дефекты, можно восстановить работоспособность подсистемы. Для h_{ps} таких возможностей нет. Это качественно иной тип состояний, возникающих по другим обстоятельствам. На схеме рис. 3 названы четыре класса возмущений – А, В, С и D, вследствие которых подсистема переходит в состояния h_{ps} .

К классу детерминированных возмущений относятся директивные изменения в нормативно-правовой и технологической документации (обновление законов, ГОСТов, ТУ, СанПиНов и др.). Сюда же относятся критические увеличения нагрузок на подсистемы, возникшие по объективным причинам в процессе длительного развития РЭС: например, увеличение потоков воды на входе городских очистных сооружений из-за роста ЖКХ, необходимость очистки воды от примесей, не предусмотренных регламентом и т.п. Диагностика состояний h_{ps} при появлении детерминированных возмущений для менеджеров особого труда не составляет. В системе оперативного управления она сводится к формальной процедуре сопоставления действующих характеристик подсистем с новыми к ним требованиями. Модель возмущений класса А можно описать известной функцией Хевисайда $\theta(t)$: $\theta(t) = 1, t \geq 0, \theta(t) = 0, t < 0$. Здесь t – время появления возмущения в подсистеме.

К классу нестационарных возмущений необходимо отнести многочисленные неполадки, возникающие в процессе естественного старения оборудования, трубопроводов, коммуникационных сетей и т.д. Сюда могут входить и «нестыковки» старого оборудования с его обновленными компонентами. Пространственная распределенность ИО приводит к ситуациям, в которых износ однотипных комплектов оборудования происходит по-разному, что затрудняет процедуру диагностики их состояний.



Рис. 3. Схема причин появления проблемных ситуаций (ПС – предельное состояние)

Если H_p – множество всех работоспособных состояний подсистемы из интервала (h_0 и h_{ps}), T – плановое время ее эксплуатации, тогда пространство работоспособных состояний представимо в виде декартова произведения $H_c = H_p \times T$. Оценка исправных состояний в H_c – вероятность безотказной работы подсистемы $P(t)$, а возможность оказаться в неисправных состояниях h_0 или h_{ps} определяется вероятностью отказа $Q(t) = 1 - P(t)$.

Ранее отмечалось, что неполадки не являются причинами перехода подсистемы в неработоспособные состояния, однако частое их возникновение в период плавной деградации оборудования, вкупе с отказами, приводит к значительному росту расходов на обслуживание техники, ее ремонту и т.п. И в этой связи перед менеджерами компаний объективно возникает вопрос о признании работоспособного состояния подсистемы проблемным. При этом решение об эволюции подсистемы должно приниматься из чисто экономических соображений. Например, по критерию «затраты – выгоды». Отсюда основной смысл обнаружения и диагностики неполадок заключается в предупреждении экономических потерь.

Прогнозирование случайных событий, ассоциируемых с потоком неполадок, возможно при использовании вероятностных моделей. В рассматриваемом случае – распределения Пуассона [17]. Его называют законом редких событий. В работе [18] закон Пуассона является основой для описания феноменологических процессов накопления повреждений в конструкционных материалах в целях прогнозирования надежности изделий.

Для потока событий, удовлетворяющего требованиям стационарности, ординарности и отсутствия последствия, закон Пуассона имеет вид

$$P(X = m) = P_m = \frac{a^m}{m!} e^{-a}, \quad (2)$$

где P_m – вероятность появления числа событий (неполадок) в заданном интервале времени t ; $a = M[X]$ – среднее число событий, приходящихся на интервал времени t . Заметим, что формула (2) применима для периода нормальной эксплуатации оборудования подсистемы, на котором $a = \lambda t$, где λ – параметр потока событий.

Нестационарный поток неполадок характерен для периода старения оборудования. И в этом случае закон Пуассона имеет более сложную структуру

$$P_m(\tau, t_0) = \frac{a^m}{m!} e^{-a}, \quad (3)$$

где $P_m(\tau, t_0)$ – вероятность появления событий на участке времени ($t_0, t_0 + \tau$); a – математическое ожидание числа событий на этом участке, определяемое выражением

$$a = \int_{t_0}^{t_0+\tau} \lambda(t) dt, \quad (4)$$

с плотностью распределения промежутков времени между соседними неполадками вида

$$f_{t_0}(t) = \lambda(t_0 + t) \exp\left(-\int_{t_0}^{t_0+t} \lambda(t) dt\right), \quad t > 0. \quad (5)$$

В процессе длительной эксплуатации промышленной подсистемы должны накапливаться экспериментальные данные обо всех типах неполадок, а на их основе производиться параметрическая идентификация моделей (2) и (3) известными

ми методами математической статистики, с использованием критериев согласия типа χ^2 , Колмогорова–Смирнова или др. [17].

Зная вид и параметры потока неполадок, можно рассчитать P_m для любого наперед заданного числа событий $m = 0, 1, \dots, \infty$ на интервале $(t_0, t_0 + \tau)$. Затем по значениям P_m , полученным для однородных потоков неполадок, можно оценить риск экономических потерь по формуле

$$R_i = P_{m_i} Y_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (6)$$

где Y_i – ожидаемый экономический ущерб РЭС, связанный с i -м типом неполадок. Суммарный риск от n -го числа неполадок равен

$$R = \sum_{i=1}^n P_{m_i} Y_i. \quad (7)$$

Значения R_i полезно знать при разработке проекта реструктуризации промышленной подсистемы, а P_m позволяют оценивать необходимость ее осуществления (эволюционирования).

На рисунке 4 изображена гипотетическая интегральная функция накопления расходов на обслуживание оборудования, связанных с появлением неполадок в моменты времени $0 < t_1 < t_2 < \dots < t_k$ и возникновением соответствующих им состояний $h(t_1), h(t_2), \dots, h(t_k)$. Критерием принятия решения о необходимости отнесения существующего состояния подсистемы в категорию «проблемных» h_{ps} является условие: $L > L_g$, где L и L_g – соответственно достигнутый и допустимый уровни затрат на устранение неполадок и отказов, возникших в результате деградации промышленной подсистемы РЭС.

К классу вероятностных возмущений относятся случайные явления различной природы, описываемые непрерывными случайными функциями на интересующем интервале времени. Воздействуя на входы подсистем, они вызывают случайные колебания переменных состояния РЭС. Примерами таких возмущений являются: нестабильность рынков, сезонный характер деловой активности, изменение спроса на товары и услуги и т.п.

В промышленных подсистемах они проявляются в виде флуктуационных помех радиосвязи, в форме сейсмических и ветровых нагрузок на строительные конструкции, спонтанных вибраций в машинах и аппаратах и колебаний качества выпускаемой продукции. В экологических подсистемах случайные явления возникают при взаимодействиях экосистем с хозяйственной деятельностью людей на смежных территориях, в результате периодических изменений погодных условий и даже при взаимодействиях популяций.

В таких случаях сложность диагностики состояний h_{ps} объясняется случайным характером поведения возмущений. При этом основная задача состоит в определении критерия или правила, позволяющего вовремя принимать решения

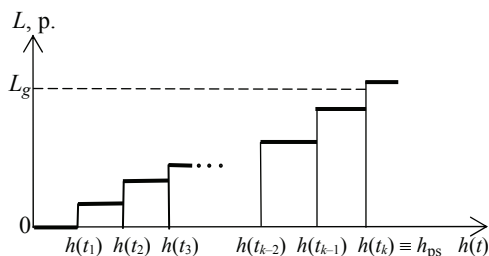


Рис. 4. Рост затрат на устранение неполадок

о необходимости реструктуризации подсистем РЭС в условиях действия возмущений класса С.

Математической моделью для описания случайных возмущений может служить случайная функция $\overset{\circ}{x}(t)$ с нулевым средним значением, представленная в форме канонического разложения [17]

$$\overset{\circ}{x}(t) = \sum_{k=0}^{\infty} (U_k \cos \omega_k t + V_k \sin \omega_k t), \quad (8)$$

где U_k, V_k – некоррелируемые случайные величины с нулевым математическим ожиданием и одинаковыми дисперсиями для каждой пары U_k, V_k с одинаковыми индексами; ω_k – частота гармонических колебаний со случайной амплитудой; t – время.

В результате действий возмущений из класса С пороговые значения, характеризующие максимальную пропускную способность подсистем, например по производительности или качеству производимых продуктов, случайным образом могут пересекаться с их реальными значениями в интервале времени $(0, T)$. Такие задачи называют «задачами о пересечениях» [19, 20]. Статистические характеристики пересечений представляют интерес и с точки зрения параметров процессов, и в аспекте решения практических задач.

Одна из задач характерна для станций водоподготовки: просачивание загрязнений в водоносный горизонт часто приводит к случайным колебаниям концентраций примесей и превышениям значений ПДК. Такие явления отражаются в отчетах кратностью превышения ПДК, безотносительно к их продолжительности. Способна ли при этом станция очищать воду – сказать затруднительно.

На рисунке 5 приведен фрагмент случайных изменений концентрации примеси $c(t)$ в водоносном горизонте. Интервалы $(t_1, t_2), (t_3, t_4)$ обозначают время нахождения $c(t)$ над уровнем γ , символизирующим ПДК.

Положим

$$r(t) = \begin{cases} (c(t) - \gamma), & \text{если } c(t) > \gamma; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Найдем среднее значение $c(t)$, превышающее γ на $(0, T)$,

$$\bar{c}(T) = \frac{1}{T} \int_0^T r(t) dt. \quad (9)$$

Правило, согласно которому производится замена оборудования станции очистки, запишем в виде

$$P[\bar{c}(T) > \gamma] \geq 1 - \varepsilon, \quad (10)$$

где P – символ вероятности; ε – достаточно малое положительное число, определяемое экспериментально на стадии проектирования станции.

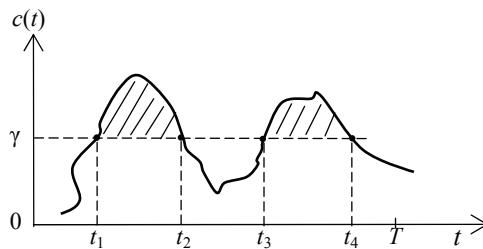


Рис. 5. Изменение состояния качества воды

К классу эмерджентных возмущений относятся непредвиденные в системе административного управления (САУ) изменения состояний подсистем, связанные с постоянным ростом статической сложности объектов РЭС в процессе их эволюционного развития. Возмущения класса D могут порождать запаздывания в информационных каналах, дублирование функций, нарушение координации, конфликты и другие неполадки, вызывающие экономические потери по линии административного управления. В подобных ситуациях требуется реконструировать САУ с учетом новых состояний подсистем, включив в ее состав функцию обнаружения и диагностики неполадок «эмерджентного» типа.

Число неполадок может оказаться весьма значительным, поскольку САУ являются широкопрофильными социотехническими системами обработки данных, предназначенными для эффективного контроля за всеми бизнес-процессами в подсистемах РЭС со стороны руководящих и финансовых органов [21]. Цели САУ множественны: 1 – информационное обеспечение процессов принятия решений на всех уровнях; 2 – планирование и прогнозирование производственной деятельности; 3 – консолидация финансовых и административных ресурсов для решения поставленных задач. Социальной компонентой в САУ являются люди, процессы и организационные структуры, технической – потоки информации, программное обеспечение и аппаратные средства. Сущностью САУ является преобразование получаемой информации в действия по схеме: анализ данных → оценка ситуаций → выбор руководящих правил → реализация решений → оценка эффективности найденных решений.

Вопрос о реструктуризации САУ должен решаться по результатам аудита экономических потерь, произошедших по линии администрирования. При этом могут использоваться диаграммы причинно-следственных связей типа деревьев отказов или вычислительные модели с управлением, использующие сети Петри [22].

Заключение

Предложены методы диагностики проблемных (климаксных) состояний промышленных и экологических подсистем РЭС. В иерархических системах управления устойчивым развитием объектов региональной экономики данные методы необходимо включать в состав процедур диагностики отказов и неполадок, возникающих в процессе функционирования подсистем.

Список литературы

1. Экологический учет для предприятий : сб. докладов ; пер. с англ. // Конф. ООН по торговле и развитию. – М. : Финансы и статистика, 1997. – 196 с.
2. Макашева, Н. А. Эволюционная экономика / Н. А. Макашева // История экономических учений : учеб. пособие / под ред. В. Автономова, О. Ананьина, Н. Макашевой. – М. : ИНФРА-М, 2003. – С. 621 – 638.
3. Файоль, А. Общее и промышленное управление / А. Файоль ; пер. Б. В. Бабина-Кореня, предисл. А. К. Гастева. – М. : Изд-во Центр. ин-та труда, 1923. – 122 с.
4. Клейнер, Г. Б. Системная экономика как платформа развития современной экономической теории / Г.Б. Клейнер // Вопросы экономики. – 2013. – № 6. – С. 4 – 28. doi: 10.32609/0042-8736-2013-6-4-28
5. Месарович, М. Теория иерархических многоуровневых систем : пер. с англ. / М. Месарович, Д. Мако, И. Такахара ; под ред. И. Ф. Шахнова. – М. : Мир, 1973. – 344 с.
6. Mahmoud, M. S. Multilevel System Control and Application: A Survey / M. S. Mahmoud // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. – 1977. – Vol. 7, Is. 3. – P. 125 – 143. doi: 10.1109/TSMC.1977.4309677

7. Попов, Н. С. О некоторых особенностях в постановке и решении региональных задач устойчивого развития. Часть V / Н. С. Попов, О. В. Милованова, А. А. Баламутова, Л. Н. Чуксина // *Вопр. совр. науки и практики*. Ун-т им. В. И. Вернадского. – 2022. – № 2(84). – С. 41 – 55. doi: 10.17277/voprosy.2022.02.pp.041-055
8. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения. Введ. 2017–07–01. – Текст : электронный. – М. : Стандартинформ, 2016. – 30 с. URL : <https://areliability.com/wp-content/uploads/2018/09/GOST-27.002-2015-Nadyozhnost-v-tehnike.-Terminy-i-opredeleniya.pdf> (дата обращения : 15.02.2023).
9. Попов, Н. С. О некоторых особенностях в постановке и решении региональных задач устойчивого развития. Часть III / Н. С. Попов, О. В. Милованова, А. А. Баламутова, Л. Н. Чуксина // *Вопр. совр. науки и практики*. Ун-т им. В. И. Вернадского. – 2021. – № 2 (80). – С. 16 – 32. doi: 10.17277/voprosy.2021.02.pp.016-032
10. Химмельблау, Д. М. Обнаружение и диагностика неполадок в химических и нефтехимических процессах / Д. М. Химмельблау ; пер. с англ. Ю. М. Левина. – Л. : Химия : Ленинград. отд-ние, 1983. – 352 с.
11. Bokrantz, J. Handling of Production Disturbances in the Manufacturing Industry / J. Bokrantz, A. Skoogh, T. Ylipaa, J. Stahre // *Journal of Manufacturing Technology Management*. – 2016. – Vol. 27, No. 8. – P. 1054 – 1075. doi: 10.1108/JMTM-02-2016-0023
12. OEE Industry Standard. – Текст : электронный – 2017. URL : <https://manoxblog.com/2017/04/16/oee-industry-standard/> (дата обращения : 15.02.2023).
13. Turner, M. G. Disturbance Dynamics and Ecological Response: The Contribution of Long-Term Ecological Research / M. G. Turner, S. L. Collins, A. L. Lugo, J. J. Magnuson, T. S. Rupp, F. J. Swanson // *BioScience*. – 2003. – Vol. 53, No. 1. – P. 46 – 56. doi: 10.1641/0006-3568(2003)053[0046:DDAERT]2.0.CO;2
14. Leitao, P. Predictive Disturbance Management in Manufacturing Control Systems – Текст : электронный / P. Leitao, F. Restivo. – 2004. – URL : <https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/1546/1/2004-IMSForum.pdf> (дата обращения : 15.02.2023).
15. Frizelle, G. Disturbance Measurement in Manufacturing Production Systems / G. Frizelle, D. McFarlane, L. Bongaerts // *Proc. of ASI'98*. Bremen, Germany. – June, 1998. – P. 1 – 12.
16. Шеннон, К. Э. Работы по теории информации и кибернетике : сб. ст. / К. Э. Шенон ; под ред. Р. Л. Добрушина и О. Б. Лупанова. – М. : Изд-во иностранной литературы, 1963. – 829 с.
17. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей : учеб. для вузов / Е. С. Вентцель. – М. : Наука, 1964. – 576 с.
18. Богдановф, Дж. Вероятностные модели накопления повреждений / Дж. Богдановф, Ф. Козин ; пер. с англ. С. А. Тимашева. – М. : Мир, 1989. – 341 с.
19. Крамер, Г. Стационарные случайные процессы: свойства выборочных функций и их приложения / Г. Крамер, М. Лидбеттер ; пер. с англ. Ю. К. Беляева и М. П. Ершова ; под ред. Ю. К. Беляева. – М. : Мир, 1969. – 398 с.
20. Тихонов, В. И. Выбросы случайных процессов / В. И. Тихонов. – М. : Наука, 1970. – 392 с.
21. Marx, F. A Maturity Model for Management Control Systems. Five Evolutionary Steps to Guide Development / F. Marx, F. Wortmann, J. Mayer // *Business & Information Systems Engineering*. – 2012. – No. 4. – P. 193 – 207. doi: 10.1007/s12599-012-0220-x
22. Питерсон, Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем / Дж. Питерсон ; пер. с англ. М. В. Горбатовой, В. А. Торхова, В. Н. Четверикова ; под ред. В. А. Горбатова. – М. : Мир, 1984. – 264 с.

Diagnostics of the Functioning States of the Regional Economy Objects in the Context of Sustainable Development

A. A. Balamutova, N. S. Popov, A. V. Andreev

*Department of Nature Management and Environmental Protection, eco@mail.tstu.ru;
TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: disturbances; troubleshooting; hierarchical management; service losses; sustainable development; economic system.

Abstract: Regional economic systems (RES) refer to systems of long-term operation, subject to a wide range of internal and external calls (disturbances). Their destabilizing action can be prevented with the help of a typical management system. However, in the tasks of managing the sustainable development of RES, the need inevitably arises for the evolution of the system due to its transition to the limiting (climax) states, diagnostics of which in management systems was not previously recognized as a necessary function. In this regard, possible methods for detecting and diagnosing such conditions are considered.

References

1. *Ekologicheskii uchet dlya predpriyatii* [Environmental accounting for enterprises], Proc. of the Conf. United Nations Trade and Development, Moscow: Finansy i statistika, 1997, 196 p. (In Russ.).
2. Makasheva N.A.; Avtonomov V., Anan'in O., Makasheva N.A. (Eds.). [Evolutionary economics], *Istoriya ekonomicheskikh ucheniy* [History of economic doctrines], Moscow: INFRA-M, 2003, pp. 621-638. (In Russ.).
3. Fayol' A. *Obshcheye i promyshlennoye upravleniye* [General and industrial management], Moscow: Izdatel'stvo Tsentrk'nogo instituta truda, 1923, 122 p. (In Russ.).
4. Kleyner G.B. [System economy as a platform for the development of modern economic theory], *Voprosy ekonomiki* [Questions of Economics], 2013, no. 6, pp. 4-28. doi: 10.32609/0042-8736-2013-6-4-28 (In Russ.).
5. Mesarovich M., Mako D., Takakhara I.; Shakhnov I.F. (Ed.). *Teoriya iyerarkhicheskikh mnogourovnevnykh sistem* [Theory of hierarchical multilevel systems], Moscow: Mir, 1973, 344 p. (In Russ.).
6. Mahmoud M.S. Multilevel System Control and Application: A Survey, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1977, vol. 7, issue 3, pp. 125-143. doi: 10.1109/TSMC.1977.4309677
7. Popov N.S., Milovanova O.V., Balamutova A.A., Chuksina L.N. [On some features in setting and solving regional problems of sustainable development. Part V], *Voprosy sovremennoj nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2022, no. 2(84), pp. 41-55. doi: 10.17277/voprosy.2022.02. pp.041-055 (In Russ., abstract in Eng.)
8. GOST 27.002-2015. *Nadezhnost' v tekhnike. Terminy i opredeleniya* [Reliability in technology. Terms and Definitions], Moscow: Standartinform, 2016. 30 p. (In Russ.), available at: <https://areliability.com/wp-content/uploads/2018/09/GOST-27.002-2015-Nadyozhnost-v-tehnike.-Terminy-i-opredeleniya.pdf> (accessed 15 February 2023).
9. Popov N.S., Milovanova O.V., Balamutova A.A., Chuksina L.N. [On some features in setting and solving regional problems of sustainable development. Part III], *Voprosy sovremennoj nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo*

[Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2021, no. 2(80), pp. 16-32. doi: 10.17277/voprosy.2021.02. pp.016-032 (In Russ., abstract in Eng.)

10. Himmelblau D.M. Fault Detection and Diagnosis in Chemical and Petrochemical Processes. Amsterdam; New York: Elsevier Scientific Pub. Co.; New York: distributors for the US and Canada, Elsevier North-Holland, 1978. 414 p.

11. Bokrantz J., Skoogh A., Ylipaa T., Stahre J. Handling of Production Disturbances in the Manufacturing Industry, *Journal of Manufacturing Technology Management*, 2016, vol. 27, no. 8, pp. 1054-1075. doi: 10.1108/JMTM-02-2016-0023

12. OEE Industry Standard. 2017. available at: <https://manoxblog.com/2017/04/16/oee-industry-standard/> (accessed 15 February 2023).

13. Turner M.G., Collins S.L., Lugo A.L., Magnuson J.J., Rupp T.S., Swanson F.J. Disturbance Dynamics and Ecological Response: The Contribution of Long-Term Ecological Research, *BioScience*, 2003, vol. 53, no. 1, pp. 46-56. doi: 10.1641/0006-3568(2003)053[0046:DDAERT]2.0.CO;2

14. Leitao P., Restivo F. Predictive Disturbance Management in Manufacturing Control Systems, 2004. available at: <https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/1546/1/2004-IMSForum.pdf> (accessed 15 February 2023).

15. Frizelle G., McFarlane D., Bongaerts L. Disturbance Measurement in Manufacturing Production Systems, *Proc. of ASI'98*. Bremen, Germany. June, 1998, pp. 1-12.

16. Shennon K.E.; Dobrushin R.L., Lupanov O.B. (Eds.). *Raboty po teorii informatsii i kibernetike* [Works on information theory and cybernetics], Moscow: Izdatel'stvo inostrannoy literatury, 1963, 829 p. (In Russ.).

17. Venttsel' Ye.S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory], Moscow: Nauka, 1964, 576 p. (In Russ.).

18. Bogdanoff Dzh., Kozin F. *Veroyatnostnyye modeli nakopleniya povrezhdeniy* [Probabilistic models of damage accumulation], S.A. Timashev (Trans.), Moscow: Mir, 1989, 341 p. (In Russ.).

19. Cramer H., Leadbetter M.R. Stationary and Related Stochastic Processes: Sample Function Properties and Their Applications. New York : Wiley, 1967,

20. Tikhonov V.I. *Vybrosy sluchaynykh protsessov* [Emissions of random processes], Moscow: Nauka, 1970, 392 p. (In Russ.).

21. Marx F., Wortmann F., Mayer J. A Maturity Model for Management Control Systems. Five Evolutionary Steps to Guide Development, *Business & Information Systems Engineering*, 2012, no. 4, pp. 193-207. doi: 10.1007/s12599-012-0220-x

22. Peterson J.L. Petri Net Theory and the Modeling of Systems, Englewood Cliffs, N. Y., Prentice-Hall, 1981. 290 p.

Diagnose der Funktionszustände von Objekten der regionalen Wirtschaft im Problem der nachhaltigen Entwicklung

Zusammenfassung: Regionale Wirtschaftssysteme (RWS) beziehen sich auf Systeme des langfristigen Betriebs, die einer Vielzahl von internen und externen Anrufen (Störungen) unterliegen. Ihre destabilisierende Wirkung kann mit Hilfe eines typischen Managementsystems verhindert werden. Bei den Aufgaben des Managements der nachhaltigen Entwicklung von erneuerbaren Energiequellen jedoch ergibt sich zwangsläufig die Notwendigkeit einer Weiterentwicklung des Systems aufgrund seines Übergangs in die Grenzzustände (Wechseljahre), deren Diagnostik in Managementsystemen bisher nicht als notwendige Funktion erkannt wurde. In diesem Zusammenhang sind die möglichen Erkennungsmethoden und Diagnose solcher Zustände untersucht.

Diagnostic de l'état du fonctionnement des objets de l'économie régionale dans le problème du développement durable

Résumé: Les systèmes économiques régionaux (SER) se réfèrent à des systèmes d'exploitation à long terme soumis à un large éventail de défis internes et externes (perturbations). Leur effet déstabilisant peut être évité à l'aide d'un système de gestion typique. Cependant, dans les tâches de gestion du développement durable de SER, il est inévitablement nécessaire d'évoluer le système en raison de son passage à des conditions extrêmes (climat), dont le diagnostic dans les systèmes de gestion n'a pas été compris auparavant comme une fonction nécessaire. À ce propos sont examinés les moyens possibles de détection et de diagnostic de tels états.

Авторы: *Баламутова Анна Андреевна* – аспирант кафедры «Природопользование и защита окружающей среды»; *Попов Николай Сергеевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Природопользование и защита окружающей среды»; *Андреев Альберт Валерьевич* – аспирант кафедры «Природопользование и защита окружающей среды»; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕРАВНОМЕРНОЙ ЗАГРУЗКИ
ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ
СЕТЕЙ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ**

А. Н. Пахомов¹, Н. Ц. Гатапова¹, В. В. Киладзе², А. Ю. Орлов³

*Кафедра «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»,
ФГБОУ ВО «ТГТУ» (1), kvidep@tstu.ru, Тамбов, Россия;
кафедра нефтегазового дела и нефтехимии,*

*ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет (2), Владивосток, Россия;
АО «Газпром газораспределение Тамбов» (3), Тамбов, Россия*

Ключевые слова: аварийность; моделирование; неравномерность расхода; потребление газа; прогнозирование; регулирование; теория клеточных автоматов.

Аннотация: Предложено применение математических методов теории клеточных автоматов для моделирования часовой и суточной неравномерности потребления газа. Моделирование потребления газа заданным объектом позволяет рассчитать общие, среднесуточные и среднечасовые расходы газа, определить коэффициенты неравномерности потребления газа, а также временные периоды минимального и максимального потребления газа в течение суток, на основе которых разработаны рекомендации по регулированию неравномерности загрузки трубопроводных систем, прогнозированию и предупреждению возникновения аварийных ситуаций.

Введение

подавляющее большинство промышленных, бытовых, социокультурных и других объектов характеризуются неравномерностью потребления природного газа. В зависимости от типа объекта потребление газа изменяется в определенном временном интервале. Соответственно, неравномерность потребления газа классифицируют (в зависимости от учитываемого временного интервала) как сезонную, суточную и часовую. В общем случае расход газа в определенный временной интервал зависит от так называемых категорий потребителей и их вклада в общий объем потребления в заданный период времени. Неравномерность потребления газа зависит от образа жизни населения в данной местности (если рассматривается объект, на котором преимущественно потребляется газ для бытовых целей), дня недели (рабочий, выходной, предпраздничный или праздничный), типа и режима работы промышленных предприятий, подключенных к устройству учета (количество, тип и состояние функционирующего газового оборудования) и климатических условий [1]. В зависимости от представленных факторов, как правило, суточный график потребления характеризуется наличием определенных периодов экстремального (максимального и минимального) газопотребления. Определение таких периодов – важная задача для управления системой газораспределения и предупреждения возможных аварийных ситуаций.

Расчет газовой сети должен быть проведен исходя из знания максимального часового расхода для заданного потребителя или группы потребителей. Однако подобные данные о часовых колебаниях потребления газа определенной категорией потребителей, как правило, трудно обобщить в виде функциональных зависимостей, так как они фактически имеют случайный характер [1]. Поэтому разработка модели потребления газа, основанная на случайном характере включения потребителей, с учетом накопленных статистических зависимостей по поведению определенных групп потребителей, является актуальной задачей.

Для решения этой задачи предлагается использовать положения теории клеточных автоматов с учетом статистически накопленных данных о поведении определенной группы потребителей (отдельного промышленного объекта, нескольких отдельных газовых приборов, сети гражданских потребителей) [2]. Достоинство применения математического аппарата клеточных автоматов – возможность разбиения объекта на отдельные элементы по физическому принципу или идеологии потребления и учета различных стратегий поведения объекта в течение заданного интервала времени (минуты, часы, сутки, недели и т.п.) [3].

Теоретические положения

В первом приближении рассмотрим поведение выборки из 1000 мелких потребителей газа (городская квартира), разбитых на три социальные группы (по статистическим данным) в период пяти рабочих суток (условно с понедельника по пятницу) [4].

Для моделирования потребления газа на выбранном объекте предложены следующие правила.

1. В соответствии со статистическими данными по социальным группам потребителей в модели выделены три группы: 1) активно использующие газовые приборы до начала рабочего дня, частично в обеденный перерыв и по окончании рабочего дня; 2) случайным образом использующие газовые приборы в течение дня, а также активно использующие газовые приборы в утренние и вечерние часы; 3) использующие газовые приборы в основном в обеденный перерыв.

2. В начальный момент времени число потребителей распределяется случайным образом, но в заданных, исходя из статистических данных переписи населения, долях.

3. Начальный момент времени для моделирования 0 часов 0 минут.

4. Шаг по времени устанавливается 15 минут, ориентируясь на среднестатистическое время использования одного газового прибора.

5. Включение и выключение газового прибора конкретным потребителем происходит случайным образом, но с разной вероятностью включения. Вероятность включения зависит от группы, к которой отнесен потребитель при начальном распределении пользователей по выборке.

6. Моделирование осуществляется до момента окончания пятых рабочих суток, соответствующих окончанию рабочей недели.

В результате, для каждого потребителя накапливаются данные по 15-минутному потреблению в течение каждых суток, которые в дальнейшем используются для расчета часового и суточного потребления газа объектом в целом и отдельными потребителями в частности, расчета коэффициента часовой и суточной неравномерности газопотребления.

Результаты моделирования, обсуждение

В таблице 1 приведены данные, полученные при моделировании часовой неравномерности потребления газа в течение пяти рабочих суток по предлагаемой модели функционирования выбранного объекта (k – коэффициент неравномерности газопотребления).

Таблица 1

**Неравномерность потребления газа по часам
в течение пяти рабочих суток**

Время, ч	Сутки									
	1		2		3		4		5	
	Расход, м ³ /ч	<i>k</i>	Расход, м ³ /ч	<i>k</i>	Расход, м ³ /ч	<i>k</i>	Расход, м ³ /ч	<i>k</i>	Расход, м ³ /ч	<i>k</i>
1:00	228	0,268	247	0,290	252	0,298	250	0,295	245	0,290
2:00	231	0,271	226	0,265	217	0,257	238	0,281	216	0,255
3:00	211	0,248	228	0,267	212	0,251	223	0,263	216	0,255
4:00	202	0,237	245	0,287	216	0,255	215	0,254	232	0,274
5:00	224	0,263	205	0,240	234	0,277	225	0,265	207	0,245
6:00	604	0,710	611	0,717	628	0,743	624	0,736	595	0,704
7:00	1809	2,126	1802	2,113	1831	2,166	1821	2,147	1823	2,156
8:00	1835	2,156	1832	2,148	1806	2,136	1830	2,158	1813	2,144
9:00	1533	1,801	1532	1,797	1528	1,807	1520	1,792	1526	1,804
10:00	614	0,721	607	0,712	590	0,698	619	0,730	609	0,720
11:00	643	0,756	637	0,747	610	0,722	637	0,751	627	0,741
12:00	653	0,767	630	0,739	603	0,713	582	0,686	601	0,711
13:00	782	0,919	776	0,910	741	0,876	784	0,925	818	0,967
14:00	1187	1,395	1171	1,373	1207	1,428	1184	1,396	1194	1,412
15:00	1006	1,182	1007	1,181	971	1,148	998	1,177	993	1,174
16:00	445	0,523	438	0,514	415	0,491	409	0,482	397	0,469
17:00	425	0,499	422	0,495	427	0,505	405	0,478	431	0,510
18:00	773	0,908	770	0,903	787	0,931	783	0,923	732	0,866
19:00	1837	2,158	1816	2,130	1799	2,128	1814	2,139	1823	2,156
20:00	1798	2,113	1830	2,146	1839	2,175	1833	2,162	1805	2,134
21:00	1514	1,779	1510	1,771	1546	1,829	1521	1,794	1510	1,786
22:00	620	0,728	647	0,759	643	0,761	636	0,750	618	0,731
23:00	638	0,750	665	0,780	576	0,681	600	0,708	619	0,732
24:00	614	0,721	611	0,717	613	0,725	601	0,709	646	0,764

На рисунках 1, 2 приведены графики усредненного часового потребления газа G в рабочие сутки и полученные значения коэффициента часовой неравномерности потребления газа k , усредненные по величинам среднесуточного потребления газа в рассматриваемый пятисуточный период.

Исходя из данных табл. 1 и рис. 2, можно сделать вывод о значительной неравномерности потребления газа на заданном объекте. Минимальное значение коэффициента неравномерности наблюдалось в периоды минимального газопотребления и в среднем составило примерно 0,3, что значительно ниже обычно наблюдаемых величин коэффициента неравномерности для группы мелких потребителей.

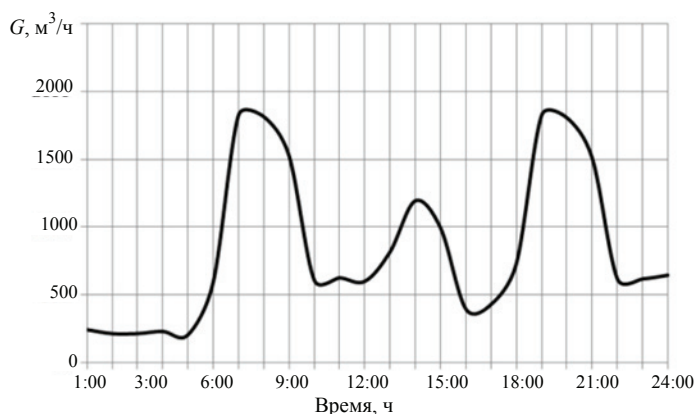


Рис. 1. График усредненного часового потребления газа

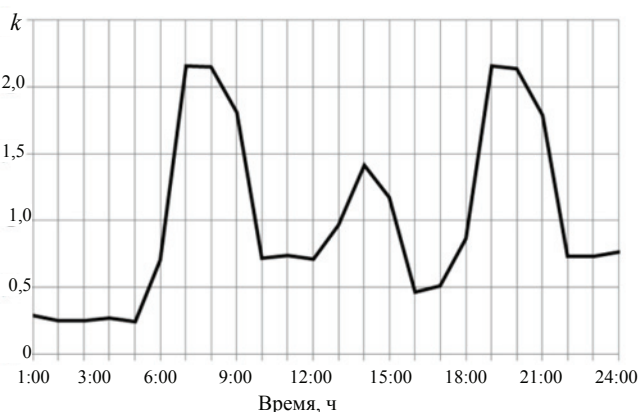


Рис. 2. График усредненного значения коэффициента часовой неравномерности потребления газа

Максимальное значение коэффициента неравномерности наблюдалось в периоды максимального газопотребления и в среднем составило примерно 2,2, что соответствует регистрируемым максимальным значениям коэффициента неравномерности для подобных объектов. Соответственно, для уточнения модели газопотребления, необходимо проанализировать характер поведения потребителей в периоды минимального газопотребления.

Важное значение для расчета возможности расширения существующей системы газораспределения имеют величины суммарного и среднечасового расхода потребляемого газа [1]. В таблице 2 приведен расчет значения суммарного и среднечасового расхода газа по рассматриваемому периоду (пять рабочих суток). Очевидно, что суммарный и среднечасовой расходы газа в конкретные сутки мало отличаются от среднего значения расхода газа в течение рабочей недели (средний суточный расход газа в рабочую неделю составил $20\,366\text{ м}^3$, средний среднечасовой расход газа в сутки в рабочую неделю составил $848,58\text{ м}^3/\text{ч}$), что хорошо согласуется с результатами замеров на газорегуляторном пункте.

Для прогнозирования возможных аварийных ситуаций и анализа возможности регулирования неравномерности потребления газа в определенные моменты времени необходим расчет максимума и минимума потребления газа в сутки и по часам [1]. В таблице 3 приведены данные по величинам суточных максимумов и минимумов потребления газа на моделируемом объекте с указанием времени, когда данные экстремумы наблюдались.

Таблица 2

Суммарный и среднечасовой расход газа по пяти рабочим суткам

Сутки	Суммарный суточный расход газа, м ³	Среднечасовой расход газа, м ³ /ч
1	20 426	851,083
2	20 465	852,708
3	20 291	845,458
4	20 352	848,000
5	20 296	845,667

Таблица 3

Сводная таблица неравномерности потребления газа по суточным максимумам и минимумам в течение пяти рабочих суток

Сутки	Максимум потребления		Минимум потребления	
	Расход, м ³ /ч	Время	Расход, м ³ /ч	Время
1	467	8:30	43	0:30
2	465	19:30	46	5:30
3	470	18:00	46	3:15
4	466	19:30	44	3:45
5	463	18:30	42	3:00

В результате анализа данных, полученных при моделировании, определены четыре локальных минимума потребления газа. Как показывают результаты анализа графиков газопотребления за пять рабочих суток, первый локальный минимум наблюдается в период с 0:00 до 6:00, второй – с 9:00 до 13:00, третий – с 15:00 до 18:00, четвертый – с 21:00 до 24:00.

В таблице 4 приведены результаты анализа локальных минимумов потребления газа в течение рабочих пяти суток с указанием объема и времени наблюдения локального минимума потребления газа в рассматриваемый период.

Отдельный интерес представляет возможность более подробного анализа данных по потреблению газа в периоды отмеченных локальных минимумов. На рисунках 3, а – г представлены графики потребления газа на моделируемом объекте в периоды соответственно первого, второго, третьего и четвертого локальных минимумов потребления.

Исходя из анализа данных, представленных на рис. 3, можно сделать вывод, что предлагаемая модель неравномерности потребления газа учитывает характерные часовые особенности потребления газа, что отражается на разном характере кривых газопотребления в выбранном временном диапазоне, соответствующем определенному локальному минимуму потребления газа.

Аналогично локальным минимумам потребления газа (важным для анализа возможности регулирования неравномерности потребления газа, например, для создания резервов газа или задействования потребителей-регуляторов) представляет интерес анализ данных по потреблению газа в периоды локальных максимумов. Анализ характера неравномерности потребления газа в период локальных максимумов важен для возможности прогнозирования и предупреждения возникновения аварийных ситуаций в моделируемом объекте.

Таблица 4

**Сводная таблица неравномерности потребления газа
по локальным минимумам в течение пяти рабочих суток**

Сутки	Первый локальный минимум		Второй локальный минимум		Третий локальный минимум		Четвертый локальный минимум	
	Расход, м ³ /ч	Время	Расход, м ³ /ч	Время	Расход, м ³ /ч	Время	Расход, м ³ /ч	Время
1	43	0:30	146	12:30	93	16:15	146	21:45
2	46	5:30	146	9:45	90	16:30	142	21:00
3	46	3:15	135	10:00	98	15:30	126	22:45
4	44	3:45	139	11:45	87	16:15	143	22:15
5	42	3:00	135	11:15	90	17:15	145	23:00

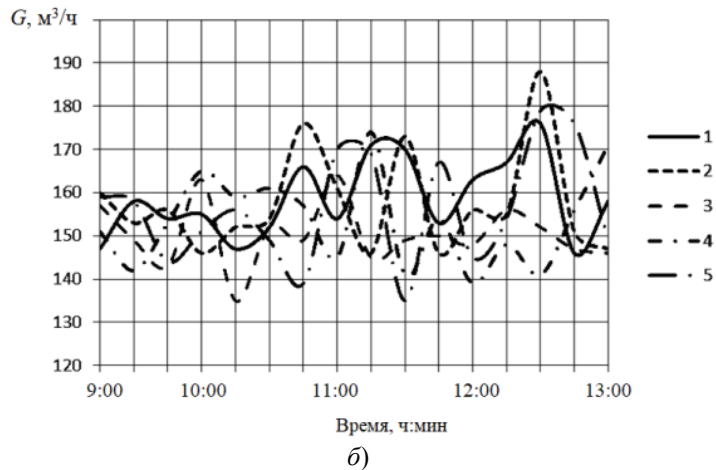
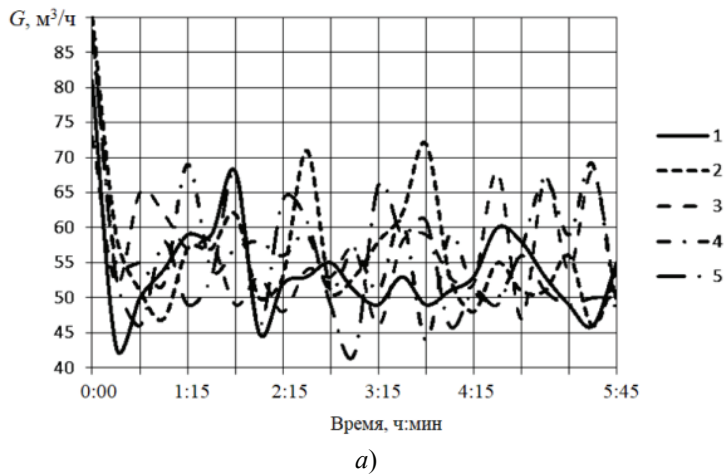
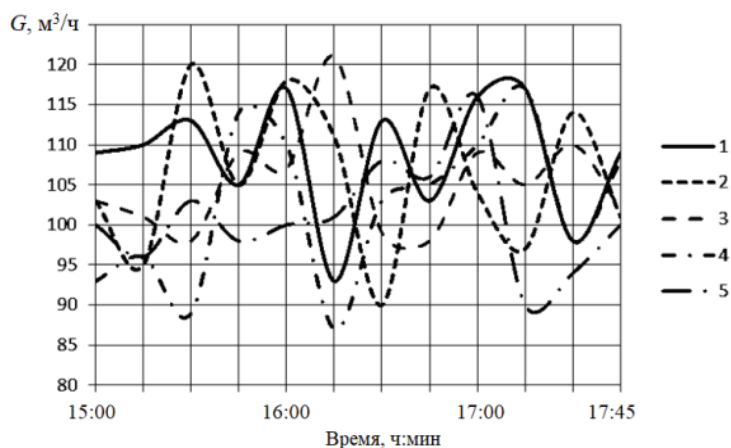
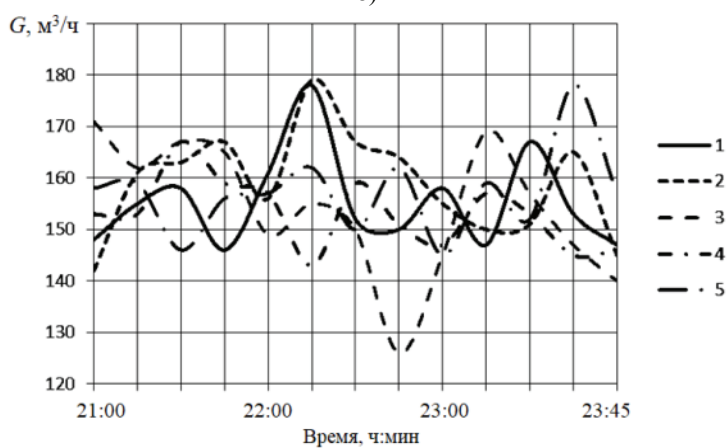


Рис. 3. Графики неравномерности потребления газа в периоды локальных минимумов потребления (начало):
а – первого (примерно с 0:00 до 6:00); *б* – второго (примерно с 9:00 до 13:00)



а)



б)

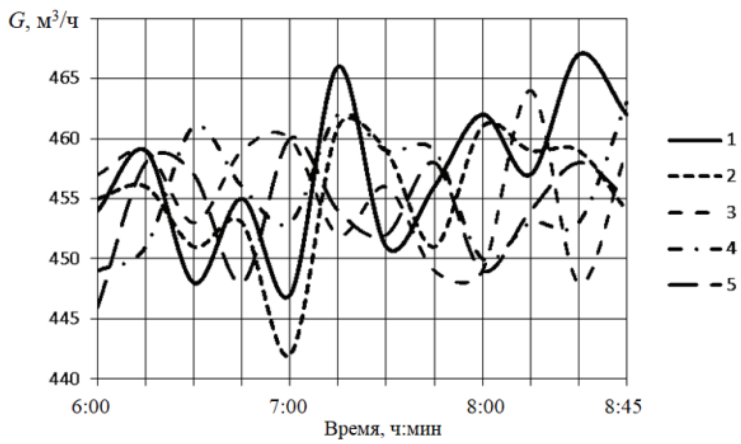
Рис. 3. Окончание:

а – третьего (примерно с 15:00 до 18:00); б – четвертого (примерно с 21:00 до 24:00)
(номер кривой соответствует суткам наблюдений (с 1 по 5 сутки))

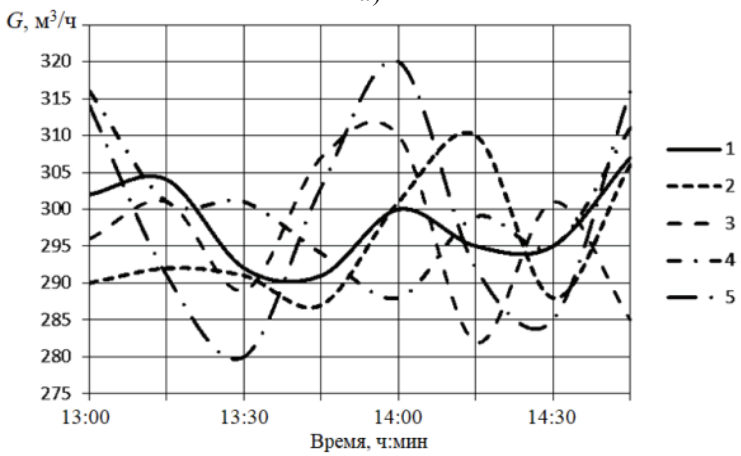
Таблица 5

**Сводная таблица неравномерности потребления газа
по локальным максимумам в течение пяти рабочих суток**

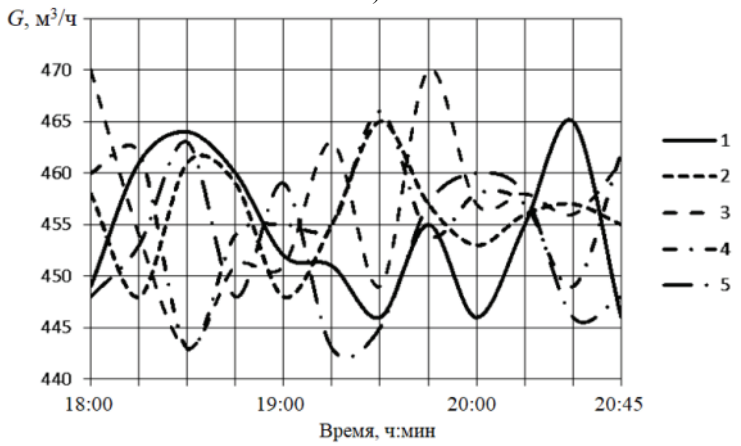
Сутки	Первый локальный максимум		Второй локальный максимум		Третий локальный максимум	
	Расход, м ³ /ч	Время	Расход, м ³ /ч	Время	Расход, м ³ /ч	Время
1	467	8:30	307	14:45	465	20:30
2	461	7:15	310	14:15	465	19:30
3	464	8:15	310	14:00	470	18:00
4	463	8:45	316	13:00	466	19:30
5	460	7:00	320	14:00	463	18:30



a)



б)



в)

Рис. 4. Графики неравномерности потребления газа в периоды локальных максимумов потребления:
a – первого (примерно с 6:00 до 9:00); *б* – второго (примерно с 13:00 до 15:00);
в – третьего (примерно с 18:00 до 21:00)
 (номер кривой соответствует суткам наблюдений (с 1 по 5 сутки))

В результате анализа данных, полученных при моделировании, определены три локальных максимума потребления газа. Установлено, что в рабочие сутки первый локальный максимум наблюдается в период с 6:00 до 9:00, второй – с 13:00 до 15:00, третий – с 18:00 до 21:00. В таблице 5 приведены результаты анализа локальных максимумов потребления газа в рассматриваемый пятисуточный период с указанием объема и времени наблюдения локального максимума газопотребления в течение рабочих суток.

На рисунках 4, а – в представлены графики потребления газа на моделируемом объекте в период соответственно первого, второго и третьего локальных максимумов.

Так же как и для локальных минимумов, исходя из анализа данных, представленных на рис. 4, можно сделать вывод, что предлагаемая модель неравномерности потребления газа учитывает часовые особенности потребления газа потребителями, что отражается на разном характере кривых газопотребления в выбранном временном диапазоне, соответствующем определенному локальному максимуму газопотребления.

Заключение

Таким образом, предложенная модель потребления газа заданным потребителем, основанная на применении клеточных автоматов с заданным статистическим распределением пользователей и правилами поведения конкретного пользователя в течение определенного периода времени, позволяет моделировать часовую и суточную неравномерность потребления газа, на основании чего возможна выработка рекомендаций по регулированию неравномерности газопотребления в периоды минимального потребления газа, а также появляется возможность прогнозирования возникновения аварийных ситуаций в периоды максимального потребления газа.

Список литературы

1. Брюханов, О. Н. Основы эксплуатации оборудования и систем газоснабжения / О. Н. Брюханов. – М. : ИНФРА-М, 2005. – 256 с.
2. Матюшкин, И. В. Обзор по тематике клеточных автоматов на базе современных отечественных публикаций / И. В. Матюшкин, М. А. Заплетина // Компьютерные исследования и моделирование. – 2019. – Т. 11, № 1. – С. 9 – 57.
3. Пахомов, А. Н. Возможности самоорганизации дисперсных систем при сушке на подложке / А. Н. Пахомов, Ю. В. Пахомова, Е. А. Ильин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2012. – Т. 18, № 3. – С. 633 – 637.
4. Пахомов, А. Н. Применение клеточных автоматов при моделировании процесса ультрафиолетового обеззараживания воды / А. Н. Пахомов, Н. Ц. Гатапова, Ю. В. Пахомова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2021. – Т. 27, № 2. – С. 255 – 262. doi: 10.17277/vestnik.2021.02.pp.255-262

Simulation of Uneven Loading of Pipeline Systems through the Example of Gas Distribution Networks

A. N. Pakhomov¹, N. Ts. Gatapova¹, V. V. Kiladze², A. Yu. Orlov³

*Department of Technological Processes, Devices and Technosphere Safety, TSTU (1),
kvidep@tstu.ru, Tambov, Russia;*

*Department of Oil and Gas Business and Petrochemistry,
Far Eastern Federal University (2), Vladivostok, Russia;*

JSC Gazprom Gas Distribution Tambov (3), Tambov, Russia

Keywords: accident rate; modeling; uneven consumption; gas consumption; forecasting; regulation; theory of cellular automata.

Abstract: The application of mathematical methods of the theory of cellular automata for modeling the hourly and daily unevenness of gas consumption is proposed. Simulation of gas consumption by a given facility enables to calculate the total, average daily and average hourly gas consumption, determine the coefficients of uneven gas consumption, as well as the time periods of minimum and maximum gas consumption during the day, on the basis of which recommendations have been developed for regulating the uneven loading of pipeline systems, forecasting and prevention of emergencies.

References

1. Bryukhanov O.N. *Osnovy ekspluatatsii oborudovaniya i sistem gazosnabzheniya* [Fundamentals of operation of equipment and gas supply systems], Moscow: INFRA-M, 2005, 256 p. (In Russ.).
2. Matyushkin I.V., Zapletina M.A. [A review on the subject of cellular automata based on modern domestic publications], *Komp'yuternyye issledovaniya i modelirovaniye* [Computer Research and Modeling], 2019, vol. 11, no.1, pp. 9-57. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Pakhomov A.N., Pakhomova Yu.V., Il'in Ye. A. [Possibilities of self-organization of dispersed systems during drying on a substrate], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no 3, pp. 633-637. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Pakhomov A.N., Gatapova N.Ts., Pakhomova Yu.V. [The use of cellular automata in modeling the process of ultraviolet water disinfection], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2021, vol. 27, no. 2, pp. 255-262. doi: 10.17277/vestnik.2021.02. pp.255-262 (In Russ., abstract in Eng.)

Modellierung der ungleichmäßigen Belastung von Rohrleitungssystemen am Beispiel der Gasverteilungsnetze

Zusammenfassung: Es ist die Anwendung mathematischer Methoden der Theorie zellulärer Automaten zur Modellierung der stündlichen und täglichen Ungleichmäßigkeit des Gasverbrauchs vorgeschlagen. Die Modellierung des Gasverbrauchs einer bestimmten Anlage ermöglicht die Berechnung des gesamten, durchschnittlichen täglichen und durchschnittlichen stündlichen Gasverbrauchs, die Bestimmung der Koeffizienten des ungleichmäßigen Gasverbrauchs sowie der Zeiträume des minimalen und maximalen Gasverbrauchs während des Tages, auf deren Grundlage Empfehlungen zur Regulierung der ungleichmäßigen Belastung von Rohrleitungssystemen, Prognose und Vermeidung von Notsituationen entwickelt worden sind.

Simulation d'un chargement inégal des systèmes de tuyauterie à l'exemple des réseaux de distribution

Résumé: Est proposé d'utiliser des méthodes mathématiques de la théorie des automates cellulaires pour modéliser l'irrégularité de la consommation de gaz horaire et quotidienne. La modélisation de la consommation de gaz par un objet donné permet de calculer la consommation totale, moyenne quotidienne et moyenne horaire de gaz, ainsi que de déterminer les coefficients d'irrégularité de la consommation de gaz et les périodes de consommation minimale et maximale de gaz au cours de la journée, à la base desquelles sont élaborées des recommandations pour la gestion de l'irrégularité du chargement des systèmes de tuyauterie, la prévision et la prévention des situations d'urgence.

Авторы: *Пахомов Андрей Николаевич* – доктор технических наук, доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Гатапова Наталья Цибиковна* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия; *Киладзе Виктория Васильевна* – магистрант, ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия; *Орлов Андрей Юрьевич* – кандидат технических наук, заместитель главного инженера, АО «Газпром газораспределение Тамбов», Тамбов, Россия.

ФАКТОРЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ РОТАЦИОННОГО СМЕШЕНИЯ ЗЕРНИСТОГО СЫРЬЯ ДЛЯ КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

А. Б. Капранова¹, Д. В. Стенько¹, Д. Д. Бахаева²,
А. А. Ватагин³, А. Е. Лебедев³

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; зернистые материалы; модель; параметры; переработка; процесс; смешение; упругие прямоугольные лопатки.

Аннотация: Предложен способ оценки эффективности ротационного смешения указанного типа сыпучих материалов по степени близости диапазонов изменения экстремальных значений углов, характеризующих получаемые потоки частиц компонентов. К основным конструктивным особенностям ротационного смешения относятся угловые смещения двух рядов однонаправленных упругих прямоугольных лопаток, расположенных по касательной к цилиндрической поверхности смесительного барабана. Моделирование законов распределения зернистых материалов выполнено с помощью энергетического метода с учетом параметров ротационного смешения в целях подготовки соответствующей киберфизической платформы.

Введение

Негативным следствием ускоренных темпов развития химической промышленности, энергетических комплексов и объектов строительной индустрии является возрастание общих объемов отходов. Необходимость переработки значительных потоков вторичного сырья [1], в том числе техногенного характера, приводит к проблеме поиска новых форм и способов достижения показателей энерго- и ресурсоэффективности. Один из видов вторичного промышленного сырья – зернистые материалы, дальнейшее применение которых или их утилизация зачастую связаны с предварительным качественным смешением. Достижение показателей однородности получаемой зернистой смеси в данной случае рассматривается как приоритетное [2, 3]. Привлечение принципов работы киберфизических систем позволяет успешно справляться с такого рода задачами [4]. При этом подготовительный этап формирования киберфизической платформы требует установления достаточно полных наборов параметров, определяющих информационные переменные проектируемого конструктивного решения для технологического процесса смешения техногенного сырья. Например, в состав подобных смесей строительного назначения может входить шлаковый песок как продукт сжигания на теплоэлектростанциях (ТЭС) топлива из твердых материалов [5]. Однако отсутствие стабильности характерных механических свойств данных продуктов переработки приводит к дополнительным сложностям получения соответствующих

качественных зернистых смесей, свободных от эффекта сегрегации при заданном регламентном гранулометрическом составе [1, 6].

Организация непрерывного режима смешения зернистых материалов в разреженных потоках требует выполнения ряда условий на технические характеристики аппарата, в которые входят, например, следующие наборы [4, 7, 8]:

- а) параметров конструкции (геометрические размеры основных смесительных элементов, рабочей камеры);
- б) режимных показателей (частота вращения барабана, высота слоев компонентов и зазор между барабаном и опорной плоскостью для указанных слоев);
- в) характеристик свойств смешиваемых компонентов и материалов конструкции (механические, физические).

Заметим, что эффективность применения смесительных элементов в виде упругих лопаток [9] или щеток [3, 4, 10] различных форм и способов закрепления на вращающемся барабане (внешним [3, 4, 10] или внутренним [11] образом) существенно зависит от их конструктивных параметров, системы дозирования.

Цель работы – оценка эффективности ротационного смешения зернистых материалов по степени близости диапазонов изменения экстремальных значений углов, характеризующих получаемые потоки частиц компонентов, на основе соответствующей стохастической модели. При этом использованы основные принципы системно-структурного анализа изучаемого процесса [12] и энергетический метод моделирования Ю. Л. Климонтовича [13] для указанного процесса ротационного смешения зернистого сырья на этапе подготовки соответствующей киберфизической платформы.

Применение комплекса режимно-конструктивных параметров процесса при моделировании ротационного смешения

На этапе формирования киберфизической платформы особую роль играют информационные параметры [7, 9] исследуемого процесса получения сыпучей смеси, в том числе из промышленных отходов. Кратко остановимся на вопросе некоторых конструктивных особенностей процесса ротационного смешения зернистого сырья, например, реализуемого в аппарате с подвижной лентой [14] или в рабочей камере с цилиндрическим корпусом [15] для указанного смесительного узла. В частности, для образования потоков сыпучих компонентов в разреженном состоянии используются смесительные барабаны с упругими лопатками. Такие прямоугольные лопатки закреплены в два ряда в одном направлении по касательной к внешней цилиндрической поверхности данного барабана с равными угловыми интервалами. Описанные ряды лопаток имеют их одинаковое число, при этом наблюдаются угловые смещения рядов по отношению друг к другу в плоскости поперечного сечения к оси барабана.

Для дальнейшего моделирования обозначим весь набор конструктивных параметров основного смесительного узла аппарата в виде следующего множества:

$$Z(t) \equiv \{A, B, X(t), Y(t)\}, \quad (1)$$

где $A \equiv \{A_{k_1} = \text{const}\}$ – параметры для смесительного узла конструкции, $k_1 = \overline{1, s_1}$; $B \equiv \{B_{k_2} = \text{const}\}$ – параметры для заданного режима непрерывного процесса переработки зернистого сырья, $k_2 = \overline{1, s_2}$; $X(t) \equiv \{X_1, X_2\} = \{X_i\}$ – входные параметры для компонента, $i = \overline{1, 2}$; $Y(t) \equiv \{V_C, X_i\}$ – выходные параметры при требуемом значении коэффициента неоднородности готового продукта V_C .

Полные множества составляющих набора Z из выражения (1) имеют вид:

$$A = \{R_b, L_b, R_C, l_b, q_b, h_b, K_s, K_r, \varepsilon\}; \quad (2)$$

$$B = \{H_0, H_{Li}, \omega\}; \quad (3)$$

$$X = \{C_{Vi}, Q_{Vi}\}; \quad (4)$$

$$Y = \{V_C^{\text{reg}}, \Delta V_C, C_{Vi}, Q_{Vi}\}, \quad (5)$$

где R_b, L_b – радиус и длина смесительного барабана соответственно; R_C – характерный размер рабочей камеры (например, ширина подвижной ленты или радиус цилиндрического корпуса для смесительного барабана); l_b, q_b, h_b – длина, ширина и высота лопатки прямоугольной формы соответственно; K_s, K_r – число упругих лопаток каждого ряда и число рядов (пусть $K_r = 2$); ε – угловые смещения для K_r рядов по отношению друг к другу в плоскости поперечного сечения к оси барабана; H_0 – высота зазора между барабаном и опорной поверхностью для слоев зернистого сырья; H_{Li} – полная высота i -го слоя на входе в указанный зазор; ω – угловая скорость вращения смесительного элемента (барабана); C_{Vi} – объемные доли смешиваемых сыпучих компонентов; Q_{Vi} – значение объемного расхода i -го зернистого материала; V_C^{reg} – регламент для оценки качества смеси по критерию в виде коэффициента неоднородности V_C ; ΔV_C – заданная абсолютная погрешность для значения V_C^{reg} .

Следовательно, с учетом того, что получаемая смесь является двухкомпонентной ($i = \overline{1,2}$), общее число информационных переменных $K_z = 19$. Кроме того, особое место в числе факторов, влияющих на характер смешивания зернистых компонентов, занимают их физико-механические характеристики, например, входящие в множество $Q = \{D_i, \rho_i\}$, здесь D_i – диаметры частиц смешиваемого зернистого сырья, $i = \overline{1,2}$; ρ_i – плотности соответствующих веществ.

Заметим, что при проектировании смесительного аппарата ротационного типа формирование оптимизационной задачи по нахождению соответствующих оптимальных значений параметров носит многофакторный характер. Однако при решении практических задач часто бывает достаточно выявить рациональные интервалы изменения параметров класса Z из выражения (1) на основе математического моделирования исследуемого процесса с учетом наиболее значимых его факторов, которые также требуется установить.

Основой проектирования ротационного аппарата для смешения зернистого сырья служит моделирование образования потоков компонентов в разреженном состоянии с позиций стохастического подхода [16, 17]: методов кибернетического характера [18], использование временных рядов [19], понятия информационной энтропии [20] и цепей Маркова при ряде модификаций [21, 22]. Имеются все предпосылки для применения методологии киберфизической системы к исследованию указанного случайного процесса смешения и разработке инженерной методики расчета его параметров. Уровень управления процессом смешения зернистого сырья (в соотношении объемных долей компонентов $C_{V1} : C_{V2}$) достигается через множество информационных переменных Z благодаря обратной связи со-

гласно (1), (2). Последние проявляются, например, в форме сравнительных расчетов прогнозируемого V_C и регламентного V_C^{reg} значений коэффициента неоднородности готовой смеси. Целесообразность применения вероятностного описания картины распределения частиц сыпучих материалов в образующихся потоках вытекает из случайного характера указанного процесса смешения. Предпочтение отдается энергетическому методу Ю. Л. Климонтовича [13], уже апробированному для решения аналогичных задач [3, 4, 9, 10].

Предпринятая попытка моделирования процесса смешения зернистых материалов для барабана с однорядным набором упругих не радиальных лопаток ($K_r = 1$) может быть расширена для случаев двухрядного ($K_r = 2$) или многорядного креплений [12]. Остановимся на втором случае, когда $K_r = 2$.

Пусть слои смешиваемых компонентов зернистого сырья ($i = \overline{1, 2}$) после их дозирования и вертикальной загрузки попадают в зазор вращающегося барабана и опорной поверхности (для подвижной ленты или соосной цилиндрической камеры). Затем частицы из указанных слоев взаимодействуют с упругими лопатками, отрываются от них и переходят в разреженное состояние, образуя однонаправленные потоки зернистых сред. С учетом случайности поведения множества частиц каждого компонента предполагается выполнение положений энергетического метода, приведенных в [13]. Пусть зернистое сырье, подлежащее переработке, имеет частицы, близкие по форме к сферическим с диаметром D_i , равным усредненному значению по фракциям. Вследствие однонаправленности движения указанных потоков ($i = \overline{1, 2}$) считается, что данные макросистемы свободны от макромасштабных флуктуаций их состояний. Поведение частиц указанных компонентов соответствует энергетически закрытым макросистемам. Тогда описание стационарного случая для решения кинетического уравнения Фоккера–Планта при однородном, стационарном случайном процессе Маркова выполняется с помощью фазовых переменных (V_{xij}, V_{yij}) или в представлении полярных координат (r_{ij}, θ_{ij}). Используя принятые выше приближения и выражая скорость центра масс частицы каждого компонента ($i = \overline{1, 2}$) в зависимости от положения конечных точек упругих лопаток при их перемещении по спирали Архимеда [9], формируется выражение для энергии стохастического движения частицы $E_{ij}(r_{ij}, \theta_{ij})$.

Указанная зависимость $E_{ij}(r_{ij}, \theta_{ij})$, согласно множеству (3), соответствует элементу фазового объема

$$d\Omega_{ij} = -\omega^2 r_{ij} dr_{ij} d\theta_{ij} \quad (6)$$

и учитывает множество параметров из выражения (1): A – для смесительного узла конструкции, $k_1 = 1, s_1$; B – для заданного режима непрерывного процесса переработки зернистого сырья, $k_2 = 1, s_2$.

В отличие от данных, приведенных в [9], уравнение спирали Архимеда

$$r_{Aij}(\theta_{ij}) = \lambda_0 + \lambda_1 \theta_{ij} \quad (7)$$

дополнительно учитывает параметр H_0 из набора (3) и наличие второго ряда лопаток ($K_r = 2$). Выражение (7) содержит коэффициенты λ_0, λ_1 , которые зависят от наборов A, B из выражений (2), (3):

$$\lambda_0 = R_b(1 - \cos \varphi_0) + H_0; \quad (8)$$

$$\lambda_1 = \frac{\left\{ [R_b(1 + \cos \varphi_0)]^2 + (R_b + l_b)^2 \right\}^{1/2} - \lambda_0 - \frac{H_0}{3}}{\varphi_\delta}; \quad (9)$$

где

$$\varphi_\delta = \pi + \operatorname{arctg} \left\{ \frac{R_b + l_b}{R_b(1 + \cos \varphi_0)} \right\}; \quad (10)$$

$$\varphi_0 = 2\pi/K_s. \quad (11)$$

Общий вид энергии стохастического движения частицы E_{ij} при $i = \overline{1, 2}$ с учетом (7) и угловой жесткости лопаток k_u задается выражением

$$E_{ij}(\theta_{ij}) = a_i D_i \omega^2 [10s_{30} w_{ij}(\theta_{ij}) + D_i^2] w_{ij}(\theta_{ij}) + k_u \theta_{ij}^2 / 2, \quad (12)$$

где с учетом (8) – (11) обозначено:

$$w_{ij}(\theta_{ij}) \equiv \frac{(\mu_0 + \mu_1 \theta_{ij})^4}{\mu_0^2 [s_0 + s_1 \theta_{ij}]^2 + s_{20}^2}; \quad (13)$$

$$a_i \equiv \frac{\pi \rho_i}{12}; \quad s_0 \equiv \cos \left\{ \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{\lambda_1}{\lambda_0} \right\}; \quad (14)$$

$$s_1 \equiv \frac{\lambda_1^2}{2n_4} \sin \left\{ \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{\lambda_1}{\lambda_0} \right\}; \quad (15)$$

$$s_{20} \equiv [s_0(1 - s_0)]^{1/2}; \quad s_{30} \equiv (s_0^2 + s_{20}^2)^{1/2}; \quad (16)$$

$$\mu_1 \equiv \frac{\frac{3n_2}{2\lambda_0^3} + n_0 n_4 \frac{\lambda_1}{\lambda_0} + \lambda_0^3 \lambda_1 \frac{2n_4(n_0^2 - \lambda_0^2) + n_3}{8n_1}}{n_4}; \quad (17)$$

$$n_0 \equiv \lambda_0 \cos \left\{ \frac{3}{2} \operatorname{arctg} \frac{\lambda_1}{\lambda_0} \right\}; \quad n_1 \equiv \frac{\lambda_0 - n_0^2 + R_b^2}{2}; \quad n_2 \equiv \lambda_1^2 \sin \left\{ \frac{3}{2} \operatorname{arctg} \frac{\lambda_1}{\lambda_0} \right\}; \quad (18)$$

$$n_3 \equiv \frac{3}{2} \lambda_0 \lambda_1 \sin \left\{ 3 \operatorname{arctg} \frac{\lambda_1}{\lambda_0} \right\}; \quad n_4 \equiv \lambda_0^2 + \lambda_1^2. \quad (19)$$

Дифференциальные функции распределения $p_{ij}(\theta_{ij})$ для числа частиц N_{ij} в потоках зернистых компонентов после работы смесительного узла «барабан – упругие лопатки» получены в зависимости от угла рассеивания θ_{ij} :

$$p_{ij}(\theta_{ij}) = \frac{1}{N_{ij}} \frac{dN_{ij}}{d\theta_{ij}}; \quad (20)$$

$$P_i(\theta_{ij}) = \prod_{j=1}^{K_r} p_i(\theta_{ij}), \quad (21)$$

где полные функции распределения $P_i(\theta_{ij})$ определяются независимыми случайными процессами взаимодействия частиц смешиваемых компонентов с упругими лопатками разных рядов, расположенных с угловыми смещениями ε . При нахождении $p_{ij}(\theta_{ij})$ и $P_i(\theta_{ij})$ в соответствии с выражениями (20), (21) использован следующий вид стационарного решения кинетического уравнения Фоккера–Планка [13]:

$$f_{ij} = \alpha_{ij} \exp\left(\frac{E_{ij}}{E_{0ij}}\right), \quad (22)$$

где параметры α_{ij} и E_{0ij} определяются соответственно нормировочными операциями и балансом энергий на этапах захвата зернистых частиц лопатками в зазоре барабана и их рассеивания в потоках. Полученные согласно (12) – (19) аналитические выражения для функций $p_{ij}(\theta_{ij})$ и $P_i(\theta_{ij})$ не приводятся вследствие их громоздкости. Результаты моделирования в дальнейшем могут быть использованы для анализа условий достижения регламентной производительности процесса смешения зернистого сырья, в том числе с учетом дополнительного этапа ударного смешивания [23, 24].

Результаты моделирования

Результаты работы смесительного узла с двумя рядами лопаток иллюстрируются на примере получения предварительного состава для строительной смеси из зернистого сырья с двумя компонентами (рис. 1–3): песка шлакового ГОСТ 5578–2019 ($i = 1$; $\rho_1 = 1,30 \cdot 10^3$ кг/м³; $D_1 = 2,25 \cdot 10^{-4}$ м) и природного песка

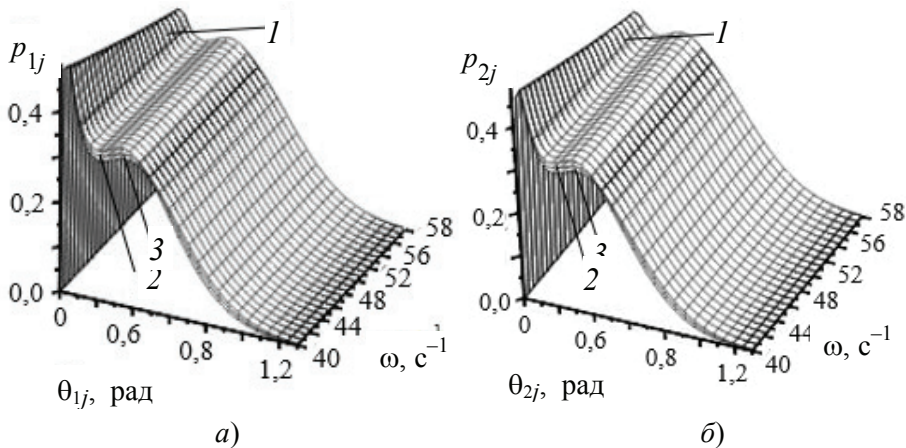


Рис. 1. Зависимость $p_{ij}(\theta_{ij}, \omega)$:

а – песок шлаковый ГОСТ 5578–2019 ($i = 1$); б – песок природный ГОСТ 8736–2014 ($i = 2$); $K_s = 8$; $K_r = 2$; $\delta = 0,67$; $1 - \varepsilon = 0$; $2 - \varepsilon = 0,3927$ рад; $3 - \varepsilon = 0,5236$ рад

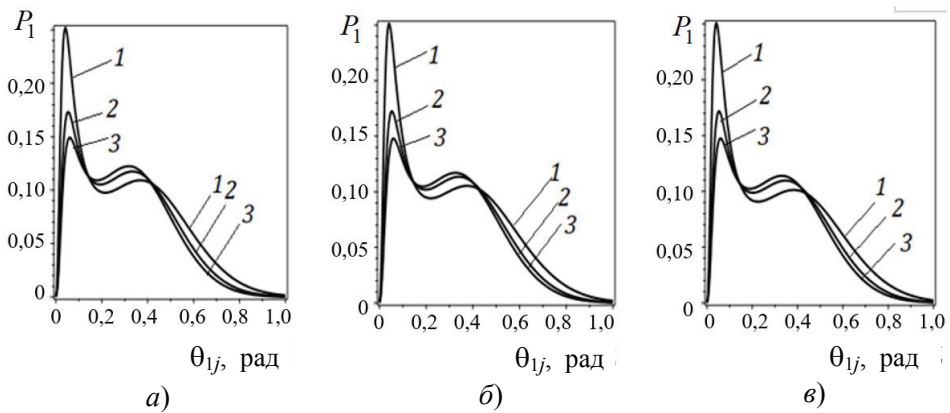


Рис. 2. Зависимость $P_1(\theta_{1j}, \omega)$ для песка шлакового ГОСТ 5578–2019 ($i = 1$):

$$K_s = 8; K_r = 2; \omega = 57,6 \text{ с}^{-1}; a - \varepsilon = 0; \delta - \varepsilon = 0,3927 \text{ рад}; \varepsilon - \varepsilon = 0,5236 \text{ рад}; \\ 1 - \delta = 0,60; 2 - \delta = 0,67; 3 - \delta = 0,70$$

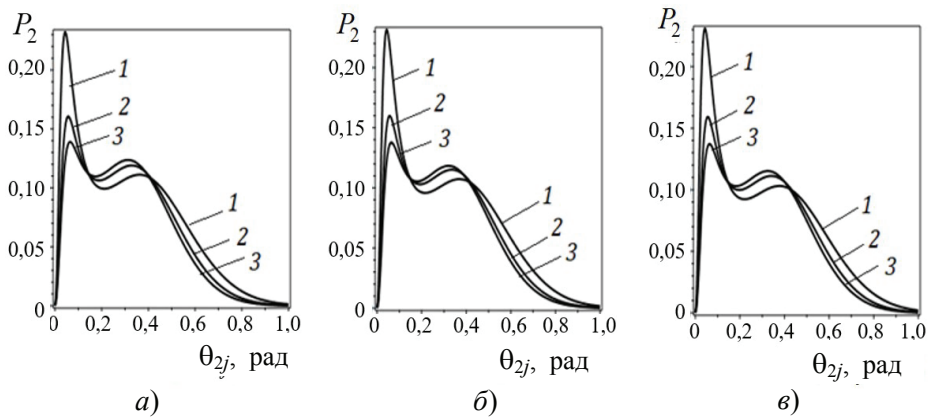


Рис. 3. Зависимость $P_2(\theta_{2j}, \omega)$ для песка природного ГОСТ 8736–2014 ($i = 2$):

$$K_r = 2; \omega = 57,6 \text{ с}^{-1}; a - \varepsilon = 0; \delta - \varepsilon = 0,3927 \text{ рад}; \varepsilon - \varepsilon = 0,5236 \text{ рад}; \\ 1 - \delta = 0,60; 2 - \delta = 0,67; 3 - \delta = 0,70$$

ГОСТ 8736–2014 при $i = 2$; $\rho_2 = 1,80 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; $D_2 = 2,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}$. Пусть $\omega = 41,0 \dots 53,0 \text{ с}^{-1}$; $R_b = 3,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; $l_b = 4,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; $K_s = 8$; $K_r = 2$; $H_0 = 3,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; $H_L = H_{L1} + H_{L2} = 3,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$. Данные о полученных значениях энергетического параметра E_{0ijk} при $\omega = 57,6 \text{ с}^{-1}$ приведены в табл. 1 [25, 26].

Анализ результатов позволяет выявить основные факторы, вносящие наибольший вклад в характер поведения искомых функций $p_{ij}(\theta_{ij})$ и $P_i(\theta_{ij})$ из выражений (20) и (21), в частности, параметры ротационного смесителя: режимные (угловая скорость ω , число рядов лопаток K_r ; угловое смещение лопаток ε) и комплексный конструктивный (степень деформации лопаток $\delta = r_b / l_b$).

Из графиков (см. рис. 1 – 3) очевидно, что важным следствием проведенных исследований является совпадение областей для экстремальных значений углов рассеивания частиц обоих компонентов, что может рассматриваться как выполнение условия эффективности работы проектируемого аппарата для смешивания зернистого сырья. Данный факт наблюдается как для дифференциальных функций

Таблица 1

Полученные значения энергетического параметра E_{0ijk} при $\omega = 57,6 \text{ с}^{-1}$

Характеристика, обозначение, размерность		Энергетический параметр E_{0ijk} , 10^{-4} Дж	
Угол смещения для рядов лопаток ε , рад	Степень деформирования лопатки δ	Песок шлаковый ГОСТ 5578–2019, $i = 1$	Песок природный ГОСТ 8736–2014, $i = 2$
0	0,60	1,34	1,30
	0,67	1,13	1,11
	0,70	1,04	1,03
0,3927	0,60	1,45	1,41
	0,67	1,23	1,19
	0,70	1,16	1,12
0,5236	0,60	1,58	1,54
	0,67	1,33	1,29
	0,70	1,23	1,19

распределения $p_{ij}(\theta_{ij})$ числа частиц N_i в потоках зернистых компонентов после работы смесительного узла «барабан – упругие лопатки» (например, графики 1, см. рис. 1, а, б), так и для полных функций $P_i(\theta_{ij})$, в том числе на рис. 2, б (график 2) и рис. 3, б (график 2). Применение рядов лопаток с угловым смещением позволяет ориентировать рассеянный поток частиц в более узкую область вблизи наиболее вероятного угла разбрасывания смешиваемых зернистых компонентов (в частности, графики 1 и 3, см. рис. 2, в; графики 1 и 3, см. рис. 3, в). Результаты проведенного исследования эффективности процесса ротационного смешивания являются частью соответствующего системно-структурного анализа данной технологической операции и в дальнейшем, аналогично [26], могут быть использованы для анализа условий достижения регламентной производительности процесса смешения зернистого сырья, в том числе с учетом дополнительного этапа ударного смешивания [27].

Заключение

Таким образом, процесс смешения зернистого сырья, в том числе техногенного, с помощью ротационного способа с применением двух рядов упругих прямоугольных лопаток рассмотрен с позиции подготовки киберфизической платформы. Указанные упругие элементы закреплены в одном направлении по касательной к внешней цилиндрической поверхности смесительного барабана. Формирование данной платформы соответствует выбору множества информационных переменных (1), в составе которого имеются параметры процесса: входные $X(t)$, выходные $Y(t)$, конструктивные A , режимные B . Заметим, что общее число этих параметров (информационных переменных) $K_z = 19$. Дополнительные учитываемые параметры – характеристики физических и механических свойств рабочих

веществ (смешиваемого зернистого сырья, упругих элементов). Применение стохастического моделирования позволило оценить эффективность ротационного процесса получения зернистых смесей по степени близости диапазонов изменения экстремальных значений углов, характеризующих получаемые потоки частиц компонентов. В частности, показано, что применение двух рядов лопаток с угловым смещением позволяет ориентировать рассеянный поток частиц в более узкую область вблизи наиболее вероятного угла разбрасывания смешиваемых зернистых компонентов.

Список литературы

1. Bauman, I. Mixing of Solids in Different Mixing Devices / I. Bauman, D. Curic, M. Boban // *Sadhana*. – 2008. – V. 33, No. 6. – Pp. 721 – 731. doi: 10.1007/s12046-008-0030-5
2. Исследование качества смеси на первой стадии работы аппарата гравитационного типа / А. Б. Капранова, И. И. Верлока, П. А. Яковлев, Д. Д. Бахаева // *Российский химический журнал (Журнал химического общества им. Д. И. Менделеева)*. – 2018. – Т. 62, № 4. – С. 48 – 50.
3. Капранова, А. Б. Стохастическое описание процесса формирования потоков сыпучих компонентов в аппаратах со щеточными элементами / А. Б. Капранова, И. И. Верлока // *Теор. основы хим. технологии*. – 2018. – Т. 52, № 6. – С. 707 – 721.
4. Kapranova, A. B. About Preparation of the Analytical Platform for Creation of a Cyber-Physical System of Industrial Mixture of Loose Components / A. B. Kapranova, I. I. Verloka, D. D. Bahaeva // In monograph: *Cyber-Physical Systems: Advances in Design &Modelling. Studies in Systems, Decision and Control / A. Kravets, A. Bolshakov, M. Shcherbakov (eds.)*. – V. 259. – Springer, Cham, 2020. – P. 81-91. doi: 10.1007/978-3-030-32579-4_7
5. Shaul, S. Generalized Flow Regime Diagram of Fluidized Beds Based on the Height to Bed Diameter Ratio / S. Shaul, E. Rabinovich, H. Kalman // *Powder Technology*. – 2012. – Vol. 228. – P. 264 – 271.
6. Макаров, Ю. И. Аппараты для смешения сыпучих материалов / Ю. И. Макаров. – М. : Машиностроение, 1973. – 216 с.
7. To the Calculation of the Average Value of the Volume Fraction of the Key Bulk Component at the Intermediate Stage of Mixing with an Inclined Bump / A. B. Kapranova, I. I. Verloka, D. D. Bahaeva, M. Yu. Tarshis, S. N. Cherpitsky // *Frontiers in Energy Research: Process and Energy Systems*. – 2020. – Vol. 8, article 135. – P. 1 – 11. doi:10.3389/fenrg.2020.00135
8. Modeling the Horizontal Movement of Bulk Material in the System “Conveyor – Rotary Mixer” / V. Zaslavskiy, S. Shved, M. Shepelenko, N. Suslo // *E3S Web Conf*. – 2020. – Vol. 166. – P. 06008. doi:10.1051/e3sconf/202016606008
9. A Model of Rotational Mixing of Loose Environment on the Platform of Cyber-Physical Systems / A. B. Kapranova, D. D. Bahaeva, D. V. Stenko, I. I. Verloka // In: *Kravets A.G., Bolshakov A.A., Shcherbakov M. (eds.) Cyber-Physical Systems: Design and Application for Industry 4.0. Studies in Systems, Decision and Control*. – Springer, Cham, 2021. – V. 342. – P. 167 –178. doi:10.1007/978-3-030-66081-9_13
10. Капранова, А. Б. Моделирование критерия качества смеси в объеме барабанно-ленточного устройства / А. Б. Капранова, М. Н. Бакин, И. И. Верлока // *Хим. и нефтегаз. машиностроение*. – 2018. – № 5. – С. 3 – 9.
11. Исследование процесса смешивания сыпучих материалов в барабанно-лопастном смесителе / С. Н. Черпицкий, М. Ю. Таршис, Л. В. Королев, А. Б. Капранова // *Хим. и нефтегаз. машиностроение*. – 2020. – Т. 56, № 1. – С. 3 – 6.

12. Кафаров, В. В. Системный анализ процессов химической технологии. Процессы измельчения и смешения сыпучих материалов / В. В. Кафаров, И. Н. Дорохов, С. Ю. Арутюнов. – М. : Наука, 1985. – 440 с.
13. Климонтович, Ю. Л. Турбулентное движение и структура хаоса: Новый подход к статистической теории открытых систем / Ю. Л. Климонтович. – М. : ЛЕНАНД, 2014. – 328 с.
14. Исследование энергетических характеристик процесса смешивания сыпучих компонентов в ротационном аппарате / А. Б. Капранова, Д. Д. Бахаева, Д. В. Стенько, И. И. Верлока // Вестник ИГЭУ. – 2020. – № 3. – С. 70 – 78. doi: 10.17588/2072-2672.2020.3.070-078
15. Пат. 2 749 510 Российская Федерация, МПК В01F 3/18, В01F 5/04, В01F 7/00, В01F 9/10. Смеситель сыпучих материалов / Лебедев А. Е., Капранова А. Б., Стенько Д. В. ; патентообладатель ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет». – № 2020123334 ; заявл. 07.07.2020 ; опубл. 11.06.2021, Бюл. № 17. – 8 с.
16. Баруча-Рид, А. Т. Элементы теории марковских процессов и их приложения / А. Т. Баруча-Рид. – М. : Наука, 1969. – 225 с.
17. Рёпке, Г. Неравновесная статистическая механика / Г. Рёпке ; пер. с нем. С. В. Тищенко ; под ред. Д. Н. Зубарева. – М. : Мир, 1990. – 320 с.
18. A Dimensionless Analysis of Residence Time Distributions for Continuous Powder Mixing / T. Geng, L. L. Sau, Ya. Xiaochuan, S. H. Moo // Powder Technology. – 2017. – Vol. 315. – P. 332 – 338. doi: 10.1016/j.powtec.2017.04.007
19. Кендалл, М. Многомерный статистический анализ и временные ряды : монография / М. Кендалл, А. Стьюарт. – М. : Наука, 1976. – 736 с.
20. Леончик, Б. И. Измерения в дисперсных потоках / Б. И. Леончик, В. П. Маякин. – М. : Энергия, 1971. – 248 с.
21. Gatumel Markov Chain Model of Mixing Kinetics for Ternary Mixture of Dissimilar Particulate Solids / V. Mizonov, I. Balagurov, H. Berthiaux, C. Gatumel // Particuology. – 2016. – Vol. 31. – P. 80 – 86. doi: 10.1016/j.partic.2016.05.006
22. Zhuang, Y. Stochastic Bubble Developing Model Combined with Markov Process of Particles for Bubbling Fluidized Beds / Y. Zhuang, X. Chen, D. Liu // Chemical Engineering Journal. – 2016. – Vol. 291. – P. 206 – 214. doi: 10.1016/j.cej.2016.01.095
23. Kapranova, A. Factors of Increasing the Performance of the Bulk Material Mixer of the Gravity Type / A. Kapranova, I. Verloka, D. Bahaeva // In: Anatolis B., Nikolai V., Vitalii S. (eds) Proceedings of EECE 2019. EECE 2019. Lecture Notes in Civil Engineering. – Springer, Cham, 2020. – Vol. 70. – P. 337 – 347. doi: 10.1007/978-3-030-42351-3_30
24. Stochastic Analysis of Impact Mixing of Bulk Materials in a Rotary Apparatus / A. Kapranova, D. Bahaeva, D. Stenko, D. Fedorova, A. Vatagin, A. Lebedev // E3s Web of Conference. – 2021. – V. 247. – P. 01048. Published online 05 April 2021. doi: 10.1051/e3sconf/202124701048
25. Анализ эффективности смешения зернистого сырья при подготовке киберфизической платформы / А. Б. Капранова, Д. В. Стенько, Д. Д. Бахаева, А. А. Ватагин, А. Е. Лебедев // Математические методы в технологиях и технике. – СПб., 2021. – Т. 1. – С. 110 – 115.
26. Analysis of the Efficiency of the Rotary Method for Producing a Mixture of Granular Raw Materials in the preparation of a cyber-physical platform / A. B. Kapranova, D. V. Stenko, D. D. Bahaeva, A. A. Vatagin, A. E. Lebedev // In book: Kravets A. G., Bolshakov A. A., Shcherbakov M. (eds). Cyber-Physical Systems: Modelling and Industrial Application, Studies in Systems, Decision and Control. – Springer Nature Switzerland AG 2022.–2022. –V. 418. – P. 299–310. doi:10.1007/978-3-030-95120-7_25

Efficiency Factors of Rotary Mixing of Granular Raw Materials for the Cyber-Physical Platform

A. B. Kapranova¹, D. V. Stenko¹, D. D. Bahaeva², A. A. Vatagin³, A. E. Lebedev³

*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; granular materials; model; parameters; process; processing; mixing; elastic blades.

Abstract: The preparation of a cyber-physical platform for processing secondary raw materials of a granular structure is an urgent problem. A method for evaluating the efficiency of rotary mixing of the specified type of bulk materials by the degree of proximity of the ranges of changes in the extreme values of the angles characterizing the resulting flows of component particles is proposed. The main design features of rotary mixing include: angular displacements of two rows of unidirectional elastic rectangular blades located tangentially to the cylindrical surface of the mixing drum. The simulation of the distribution laws of granular materials is carried out on the basis of the energy method, taking into account many parameters of the rotary mixing process in order to prepare the corresponding cyber-physical platform.

References

1. Bauman I., Curic, D., Boban, M. Mixing of solids in different mixing devices, *Sadhana*. 2008, vol. 33, no. 6, pp. 721-731. doi: 10.1007/s12046-008-0030-5
2. Kapranova A.B., Verloka I.I., Yakovlev P.A., Bahaeva D.D. Investigation of the Quality of the Mixture at the First Stage of Operation of a Gravitational Apparatus, *Russian Journal of General Chemistry*, 2020, no. 90(6), pp. 1178-1179. doi: 10.1134/S1070363220060341
3. Kapranova A.B., Verloka I.I. Studying the Porosity of Powders under Pressure Compaction in Deaeration Mixers, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2018, no. 52 (6), pp. 1004-1018. doi:10.1134/S0040579518050330
4. Kapranova A.B., Verloka I.I., Bahaeva D.D. About preparation of the analytical platform for creation of a cyber-physical system of industrial mixture of loose components, In: *Cyber-Physical Systems: Advances in Design & Modelling. Studies in Systems, Decision and Control*, Eds. A. Kravets, A. Bolshakov, M. Shcherbakov, vol. 259. Cham: Springer, 2020, pp. 81-91. doi: 10.1007/978-3-030-32579-4_7
5. Shaul S., Rabinovich E., Kalman H. Generalized flow regime diagram of fluidized beds based on the height to bed diameter ratio, *Powder Technology*, 2012, vol. 228, pp. 264-271.
6. Makarov Yu.I. *Apparaty dlya smesheniya sypuchikh materialov* [Devices for mixing bulk materials], Moscow: Mashinostroyeniye, 1973, 216 p. (In Russ.).
7. Kapranova A.B., Verloka I.I., Bahaeva D.D., Tarshis M.Yu., Cherpitsky S.N. To the calculation of the average value of the volume fraction of the key bulk component at the intermediate stage of mixing with an inclined bump, *Frontiers in Energy Research: Process and Energy Systems*, 2020, vol. 8, article 135, pp. 1-11. doi: 10.3389/fenrg.2020.00135
8. Zaselskiy V., Shved S., Shepelenko M., Suslo N. Modeling the horizontal movement of bulk material in the system "conveyor – rotary mixer", *E3S Web Conf.*, 2020, vol. 166, 06008. doi: 10.1051/e3sconf/202016606008
9. Kapranova A.B., Bahaeva D.D., Stenko D.V., Verloka I.I. A Model of rotational mixing of loose environment on the platform of cyber-physical systems.

In: Kravets A.G., Bolshakov A.A., Shcherbakov M. (Eds.) *Cyber-Physical Systems: Design and Application for Industry 4.0. Studies in Systems, Decision and Control*, Cham: Springer, 2021, vol. 342, pp. 167-178. doi: 10.1007/978-3-030-66081-9_13

10. Kapranova A.B., Bakin M.N., Verloka I.I. Simulation of the Quality Criterion of a Mixture in a Drum-Belt Apparatus, *Chemical and Petroleum Engineering*, 2018, vol. 54, no. 5-6, pp. 287-297. doi: 10.1007/s10556-018-0477-0

11. Cherpitskii S.N., Tarshis M.Y., Korolev L.V., Kapranova A.B. An Investigation of the Process of Mixing of Bulk Materials in a Drum-Blade Mixer. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2020, vol. 56, no. 1, 3-10. doi: 10.1007/s10556-020-00731-w

12. Kafarov V.V., Dorokhov I.N., Arutyunov S.Yu. *Sistemnyi analiz protsessov khimicheskoi tekhnologii. Protsessy izmel'cheniya i smesheniya sypuchikh materialov* [System analysis of the processes of chemical technology. Processes of grinding and mixing of bulk materials], Moscow: Nauka, 1985, 440 p. (In Russ.).

13. 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.).

14. Kapranova A.B., Bakhaeva D.D., Stenko D.V., Verloka I.I. [Investigation of the energy characteristics of the process of mixing bulk components in a rotary apparatus], *Vestnik IGEU [Transactions of the Ivanovo State Energy University]*, 2020, no. 3, pp. 70-78. doi: 10.17588/2072-2672.2020.3.070-078 (In Russ., abstract in Eng.).

15. Lebedev A.E., Kapranova A.B., Stenko D.V. *Smesitel sypuchikh materialov* [Mixer of bulk materials], Russian Federation, 2021, Pat. 2749510. (In Russ.).

16. Barucha-Rid A.T. *Elementy teorii markovskikh protsessov i ikh prilozheniya* [Elements of the theory of Markov processes and their applications], Moscow: Nauka, 1969, 225 p. (In Russ.).

17. Röpke G. *Neravnovesnaya statisticheskaya mekhanika* [Nonequilibrium Statistical Mechanics]; translation from German by S.V. Tishchenko, ed. D.N. Zubareva. Moscow: Mir, 1990, 320 p. (In Russ.).

18. Geng T., Sau L.L., Xiaochuan Ya., Moo S.H. A dimensionless analysis of residence time distributions for continuous powder mixing, *Powder Technology*, 2017, vol. 315, pp. 332-338. doi: 10.1016/j.powtec.2017.04.007

19. Kendall M., Stuart A. *Mnogomernyy statisticheskiy analiz i vremennyye ryady: monografiya* [Multivariate statistical analysis and time series: monograph]. Moscow: Nauka, 1976, 736 p. (In Russ.).

20. Leonchik B.I., Mayakin V.P. *Izmereniya v dispersnykh potokakh* [Dispersed flow measurements], Moscow: Energiya, 1971, 248 p. (In Russ.).

21. Mizonov V., Balagurov I., Berthiaux H., Gatamel C. Gatamel Markov chain model of mixing kinetics for ternary mixture of dissimilar particulate solids. *Particuology*, 2016, vol. 31, pp. 80-86. doi: 10.1016/j.partic.2016.05.006

22. Zhuang Y., Chen X., Liu D. Stochastic bubble developing model combined with Markov process of particles for bubbling fluidized beds. *Chemical Engineering Journal*, 2016, vol. 291, pp. 206-214. doi: 10.1016/j.cej.2016.01.095

23. Kapranova A., Verloka I., Bahaeva D. Factors of Increasing the performance of the bulk material mixer of the gravity type. In: Anatolijs B., Nikolai V., Vitalii S. (Eds.) *Proceedings of EECE 2019. EECE 2019. Lecture Notes in Civil Engineering*, Springer, Cham, 2020, 2020, vol. 70, pp. 337-347. doi: 10.1007/978-3-030-42351-3_30

24. 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, published online 05 April 2021. doi: 10.1051/e3sconf/202124701048

25. Kapranova A.B., Stenko D.V., Bahaeva D.D., Vatagin A.A., Lebedev A.E. [Analysis of the efficiency of mixing granular raw materials in the preparation of a cyberphysical platform], *Matematicheskiye metody v tekhnologiyakh i tekhnike* [Mathematical methods in technologies and engineering]. St. Petersburg, 2021, no. 1, pp. 110-115. (In Russ.).

26. Kapranova A.B., Stenko D.V., Bahaeva D.D., Vatagin A.A., Lebedev A.E. Analysis of the efficiency of the rotary method for producing a mixture of granular raw materials in the preparation of a cyber-physical platform. In: Kravets A.G., Bolshakov A.A., Shcherbakov M. (Eds). *Cyber-Physical Systems: Modelling and Industrial Application, Studies in Systems, Decision and Control*. Springer Nature Switzerland AG 2022, 2022, vol. 418, pp. 299-310. doi: 10.1007/978-3-030-95120-7_25

Effizienzfaktoren des Rotationsmischens körniger Rohstoffe für die cyber-physikalische Plattform

Zusammenfassung: Es ist ein Verfahren zur Bewertung der Effizienz des Rotationsmischens der angegebenen Art von Schüttgütern anhand des Grades der Nähe der Änderungsbereiche der Extremwerte der Winkel vorgeschlagen, die die resultierenden Strömungen der Komponentenpartikel charakterisieren. Die Hauptkonstruktionsmerkmale des Rotationsmischens umfassen: Winkelverschiebungen von zwei Reihen von unidirektionalen elastischen rechteckigen Schaufeln, die tangential zur zylindrischen Oberfläche der Mischtrommel angeordnet sind. Die Modellierung der Verteilungsgesetze von körnigen Materialien ist auf der Grundlage der Energiemethode unter Berücksichtigung der Parameter der Rotationsmischung durchgeführt, um eine entsprechende cyber-physikalische Plattform vorzubereiten.

Facteurs d'efficacité du mélange rotatif des matières premières granulaires pour la plate-forme cyberphysique

Résumé: Est proposé le moyen d'évaluer l'efficacité du mélange rotatif du type indiqué de matière en vrac en fonction du degré de proximité des plages de variation des valeurs extrêmes des angles caractérisant les flux de particules des composants obtenus. Les principales caractéristiques de conception du mélange rotatif sont les décalages angulaires de deux rangées de pales rectangulaires élastiques unidirectionnelles situées tangentiellement à la surface du tambour de mélange. La modélisation des lois de distribution des matériaux granulaires est réalisée à la base du procédé énergétique, en tenant compte des paramètres de mélange rotatif, afin de préparer une plate-forme cyber-physique appropriée.

Авторы: *Капранова Анна Борисовна* – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная механика»; *Стенько Дмитрий Владимирович* – аспирант кафедры «Теоретическая и прикладная механика»; *Бахаева Дарья Дмитриевна* – старший преподаватель кафедры «Информационные системы и технологии»; *Ватагин Александр Александрович* – аспирант кафедры «Технологические машины и оборудование»; *Лебедев Антон Евгеньевич* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технологические машины и оборудование», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Ярославль, Россия.

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНО-КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРАВИТАЦИОННОГО ПОТОКА ЗЕРНИСТОЙ СРЕДЫ НА ЭФФЕКТЫ СЕПАРАЦИИ ПО РАЗМЕРУ И ПЛОТНОСТИ

О. О. Иванов¹, А. Г. Тараканов², К. А. Куди³, В. Н. Долгунин²

*Кафедра «Технологии и оборудование пищевых и химических производств» (2),
dolgunin-vn@yandex.ru, ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия;
КБ «Ренессанс Кредит» (ООО) (3), Тамбов, Россия*

Ключевые слова: гравитационное течение; зернистый материал; математическое моделирование; сепарация по размеру и плотности.

Аннотация: Математическая модель динамики сепарации частиц по размеру и плотности в быстром гравитационном потоке использована для исследования влияния его структурных и кинематических характеристик на эффективность процесса. Установлено, что эффективность сепарации примеси крупных частиц возрастает с увеличением скорости сдвига, достигая предельных значений при скорости сдвиговой деформации $(80 \pm 5) \text{ с}^{-1}$. Это объясняется доминированием сегрегации при высоких значениях скорости сдвига и концентрации твердой фазы, которое постепенно переходит к квазидиффузионным эффектам сепарации и перемешивания с возрастанием объемной доли пустот в потоке. Исследовано влияние неоднородности распределения концентрации твердой фазы для различных вариантов формы профилей распределений в сдвиговом потоке на интенсивность сепарации по плотности. Установлено, что наиболее высокая эффективность сепарации по плотности достигается при формировании в потоке параболического вогнутого профиля концентрации твердой фазы в результате возрастания движущей силы квазидиффузионной сепарации и встречного направления потоков сепарации в центральную часть слоя.

Технологии зернистых материалов в промышленности и сельском хозяйстве, в общем случае, сопряжены с осуществлением процессов переработки и операций транспортирования, которые сопровождаются взаимным перемещением неоднородных частиц. Взаимодействия неоднородных частиц в режиме относительных перемещений приводят к их упорядоченному перераспределению в технологическом потоке по сходственным свойствам. Соответствующий физический эффект, играющий важную роль в технологии зернистых материалов, называют сегрегацией, а технологические потоки, в которых вследствие сегрегации сформированы области с высокой концентрацией частиц со сходственными свойствами, – сегрегированными [1, 2]. Таким образом, сегрегированные потоки представляют собой некоторую совокупность элементарных сегрегированных потоков, каждый из которых характеризуется повышенным содержанием частиц определенного свойства.

В соответствии со спецификой физико-механических свойств частиц элементарных сегрегированных потоков они приобретают специфические реологические свойства, которые обеспечивают их перемещение в определенной зоне рабочего объема оборудования при характерных параметрах гидродинамической структу-

ры потоков – среднем значении и дисперсии распределения времени пребывания. Вследствие формирования сегрегированных потоков, технологическая обработка неоднородных частиц осуществляется в различных условиях, отличающихся интенсивностью, временем и однородностью технологического воздействия [3 – 5]. Если технологическим эффектом от формирования сегрегированных потоков пренебречь не представляется возможным, то возникает технологическая целесообразность оказания воздействия на процесс их формирования. В зависимости от того, является ли технологический эффект от формирования сегрегированных потоков негативным или желательным, следует стремиться либо к подавлению, либо интенсификации сегрегации.

Физические механизмы и кинетика сегрегации принципиально зависят от условий взаимодействия частиц [6]. Вследствие этого, представляется возможным воздействовать на эффекты сегрегации путем изменения условий взаимодействия частиц в технологических потоках. В рамках настоящей работы проводится поиск путей решения такого рода задачи для одного из технологически важных случаев технологического потока.

Наиболее общим случаем формирования условий для яркого проявления сегрегации характеризуются быстрые гравитационные течения [7]. Такого рода течения формируются на естественных откосах несвязных зернистых материалов в машинах и аппаратах, силосах, бункерах и буртовых хранилищах, на вибрационных и гравитационных технологических и транспортирующих скалах и др. Характерная особенность такого рода течений – взаимодействие частиц в режиме быстрой сдвиговой деформации, происходящей под воздействием гравитации. В таких условиях напряжения генерируются преимущественно под действием ударных импульсов, которыми обмениваются частицы, взаимодействуя друг с другом через поверхность сдвига. При этом частицы имеют кроме скорости поступательного перемещения в направлении сдвига ярко выраженную хаотически распределенную в пространстве скорость флуктуаций. Скорость флуктуаций вызывает дилатансию среды и во многом определяет ее реологические (вязкостные) свойства в состоянии быстрого сдвига, обнаруживая определенную аналогию с газом. В связи с этим зернистые материалы в условиях быстрого сдвигового течения часто называют «газом твердых частиц» [8].

Перечисленные особенности быстрых гравитационных течений позволили адаптировать для описания их динамики основные положения молекулярно-кинетической теории плотного газа [9] и на ее базе сформулировать уравнение состояния зернистой среды в условиях быстрого гравитационного сдвига. Уравнение состояния [10] описывает взаимосвязь между дилатансией $\bar{\varepsilon}$, отражающей относительное увеличение доли свободного объема в зернистой среде под воздействием сдвиговой деформации, «температурой» зернистой среды E , представляющей собой кинетическую энергию частиц в их взаимных перемещениях, и литостатическим давлением p

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\chi E}{p}, \quad (1)$$

где χ – коэффициент уравнения состояния зернистой среды при быстром гравитационном сдвиге, зависящий от физико-механических свойств частиц [7].

Дилатансия потока $\bar{\varepsilon}$ в расчете на единицу объема твердой фазы определяется выражением

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon_0}, \quad (2)$$

где ε , ε_0 – локальное значение объемной доли пустот в слое в условиях сдвиговой деформации и объемная доля пустот для слоя в состоянии покоя соответственно.

В рамках решаемой задачи температуру зернистой среды представляется возможным выразить в классическом варианте ее представления [8] как энергию хаотических колебаний частиц ($\text{кг}\cdot\text{м}^2\cdot\text{с}^{-2}$):

$$E = \frac{\pi d^3}{12} \rho (V')^2, \quad (3)$$

где V' – скорость флуктуаций частиц, $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$; d – диаметр частиц, м; ρ – плотность частиц, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$.

Скорость флуктуаций частиц определяется как функция частоты f , с^{-1} , столкновений частиц, участвующих в переносе импульса через поверхность сдвига [7, 10], и среднего расстояния s , м, между частицами слоя

$$(V')^2 = (2fs)^2 = \Phi \left(\frac{du_x}{dy} \right)^2, \quad (4)$$

где u_x – среднее значение скорости перемещения частицы в направлении сдвига x , $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$; y – декартова координата в направлении основания потока; Φ – коэффициент, зависящий от физико-механических свойств частиц; du_x/dy – скорость сдвиговой деформации в гравитационном потоке, с^{-1} .

Литостатическое давление p , $\text{Н}\cdot\text{м}^{-2}$, вычисляется следующим образом:

$$p(y) = \int_{h-y}^h \rho(y)(1 - \varepsilon(y)g \cos \alpha) dy, \quad (5)$$

где h – высота слоя, м; α – угол наклона ската к горизонту; g – гравитационное ускорение, $\text{м}\cdot\text{с}^{-2}$.

С учетом выражений (3), (4) представляется возможным заменить температуру зернистой среды E в уравнении состояния зернистого материала в условиях быстрой сдвиговой деформации (1) ее функционалом, включающим скорость сдвиговой деформации в качестве параметра состояния среды,

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\Psi \left(\frac{du_x}{dy} \right)^2}{p}, \quad (6)$$

где Ψ – коэффициент, зависящий от физико-механических свойств частиц.

Уравнение состояния (6) определяет взаимную корреляцию распределений скорости и концентрации твердой фазы в быстром гравитационном потоке и позволяет по одному из названных распределений определять другое распределение. Поскольку коэффициент Ψ в уравнении (6) можно принять независимым от структурно-кинематических параметров потока в достаточно широком диапазоне их изменения [11], то в результате обеспечиваются условия для проведения на его базе виртуального вычислительного эксперимента по исследованию влияния условий гравитационного течения на эффекты сепарации.

Виртуальный эксперимент проведен на базе общего уравнения динамики сепарации [7], которое учитывает сегрегацию как один из эффектов сепарации, наряду с эффектом квазидиффузионной сепарации, а также потоки конвекционного и квазидиффузионного перемешивания. Для случая двухмерного гравитационного течения уравнение описывает динамику поля концентрации контрольного компонента $c(x, y, \tau)$

$$\frac{\partial c(x, y, \tau) \rho_b}{\partial \tau} = -\frac{\partial \text{disc} \rho_b}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho_b \left(D_{\text{dif}} \frac{\partial c}{\partial y} - D_m c \frac{\partial \ln s}{\partial y} - K \Delta M c \right) \right), \quad (7)$$

где $\rho_b = \rho(1 - \varepsilon(y))$ – насыпная плотность частиц; D_{dif} и D_m – кинетические коэффициенты соответственно квазидиффузионного перемешивания и квазидиффузионной сепарации (миграции), которые определяются аналитически, $\text{м}^2 \text{с}^{-1}$; K – коэффициент сегрегации, $(\text{Н} \cdot \text{с})^{-1}$; ΔM – вычисляемая аналитически движущая сила сегрегации, $\text{Н} \cdot \text{м}$ [6, 7]. Коэффициент сегрегации K является единственной кинетической характеристикой уравнения (7), которая определяется экспериментально [6, 7] в виде константы для достаточно широкого диапазона изменения свойств частиц.

Начальные и граничные условия для уравнения динамики сепарации (6) формулируются в следующем традиционном виде [6, 7]:

$$D_{\text{dif}} \frac{\partial c}{\partial y} = c D_m \frac{\partial \ln s}{\partial y} = K_s c \Delta M \Big|_{y=0, h} = 0; \quad (8)$$

$$c(0, t, y) = c_0, \quad c(t, 0, y) = c_0, \quad (9)$$

где c_0 – среднее значение концентрации контрольного компонента в потоке, $\text{кг}/\text{кг}$.

Согласно результатам исследования [6] процесс сепарации примеси крупных частиц протекает при определяющем значении эффекта сегрегации в соответствии с механизмом гидромеханического разделения, интенсивность которого определяется скоростью сдвига. Сепарация примеси частиц по плотности осуществляется при доминирующем значении эффекта миграции (квазидиффузионной сепарации) [6, 12]. Интенсивность квазидиффузионной сепарации определяется градиентом объемной доли твердой фазы в гравитационном потоке. Характер распределений скорости сдвига и объемной доли твердой фазы в потоке зернистой среды определяется с использованием уравнения состояния (6), которое позволяет в виртуальном эксперименте произвольным образом варьировать одним из распределений в гравитационном потоке и определять соответствующее ему распределение другого параметра.

Исследование влияния структурных и кинематических параметров гравитационного потока зернистого материала на эффекты сепарации по размеру и плотности проведено при использовании в качестве базового варианта параметров полученных экспериментальным методом [6] профилей скорости $u(y)$ и объемной доли твердой фазы $v(y)$ бинарной смеси стеклянного бисера (рис. 1).

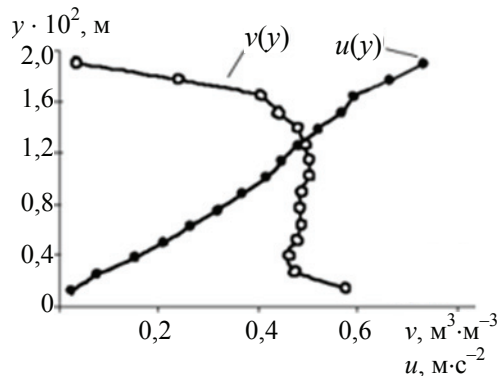


Рис. 1. Профили осредненных значений поступательной скорости $u(y)$ и объемной доли твердой фазы $v(y)$ в быстром гравитационном потоке на шероховатом скате для бисера с фракционным составом +3,25 – 3,5 мм (88 %) и +3,6 – 3,75 мм (12 %)

Исследование влияния скорости сдвига на сепарацию частиц по размеру в гравитационном потоке проводили, задаваясь виртуальными профилями продольной скорости перемещения частиц на шероховатом скате. При этом исходили из экспериментального профиля скорости (рис. 2, *a*), но в целях внесения определенности в задачу исследования скорость сдвига принималась постоянной по высоте слоя. Далее с использованием уравнения (6) определяли профили объемной доли твердой фазы, соответствующие назначенным профилям скорости (рис. 2, *b*).

На базе установленных структурных и кинематических параметров гравитационного потока с использованием уравнения (7) при граничных и начальных условиях (8) и (9) проводилось моделирование динамики сепарации частиц. Моделирование осуществлялось путем интегрирования уравнения (7) численным методом с использованием конечно-разностной схемы Кранка–Николсон [13]. Для анализа степени влияния различных эффектов сепарации на динамику процесса моделирование проводилось по трем вариантам: 1) с учетом только эффекта квазидиффузионной сепарации; 2) с учетом только эффекта сегрегации; 3) при комплексном учете названных эффектов сепарации. Эффективность сепарации оценивалась путем определения неоднородности распределения контрольного компонента в потоке, которая выражалась с использованием коэффициента вариации:

$$V = \frac{100}{\bar{c}} \sqrt{\frac{\sum u_i (1 - \varepsilon_i) \rho_i(c) \Delta H_i}{\sum u_i (1 - \varepsilon_i) \rho_i(c) \Delta H_i} (c_i - \bar{c})^2}, \quad (10)$$

где \bar{c} , c_i – средние значения концентрации контрольного компонента в потоке и в его i -м подслое соответственно, кг/кг; u_i – среднее значение продольной скорости частиц i -го подслоя потока, м/с; ρ_i – средняя плотность частиц в i -м подслое потока материала, кг/м³; ΔH_i – толщина i -го подслоя, м.

Зависимость коэффициента вариации V в распределении концентрации крупных частиц модельной смеси от скорости сдвига в быстром гравитационном потоке при инвариантной толщине слоя представлена на рис. 3. Полученная зависимость $V = f(du/dy)$ обнаруживает ярко выраженный максимум при скорости сдвиговой деформации, равной $(80 \pm 5) \text{ с}^{-1}$.

Наличие экстремальных значений коэффициента вариации распределения концентрации различных по размеру частиц в потоке позволяет объяснить варианты моделирования динамики процесса с альтернативным учетом того или иного

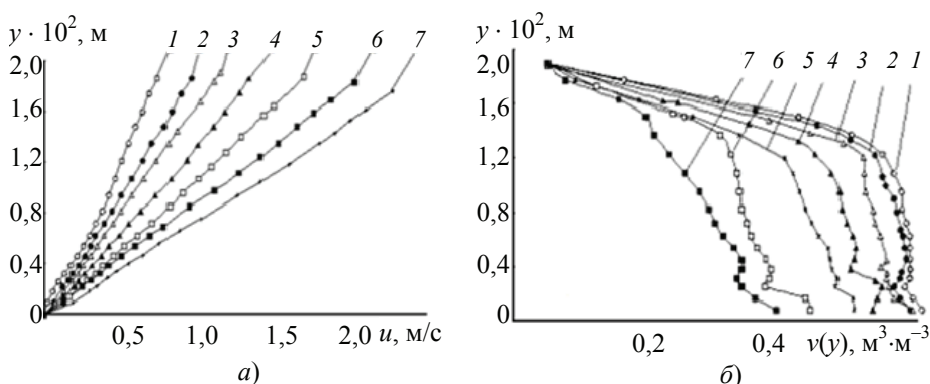


Рис. 2. Экспериментальные (1) и виртуальные (2 – 7) профили осредненных значений поступательной скорости (*a*) и объемной доли твердой фазы (*b*) в быстром гравитационном потоке бисера при средних значениях скорости сдвига du/dy , с^{-1} : 1 – 40; 2 – 50; 3 – 60; 4 – 70; 5 – 80; 6 – 95; 7 – 110

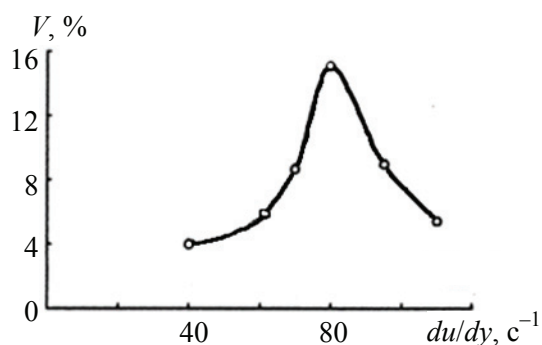


Рис. 3. Коэффициент вариации состава бидисперсной смеси частиц бисера как функция скорости сдвига в быстром гравитационном потоке

эффекта сепарации. Результаты моделирования свидетельствуют, что увеличение коэффициента вариации с увеличением скорости сдвига на восходящем участке кривой происходит вследствие доминирования в соответствующих условиях эффекта сегрегации. Снижение коэффициента вариации при дальнейшем увеличении скорости сдвига объясняется переходом доминирующей роли от сегрегации к квазидиффузионной сепарации, который вызван интенсификацией квазидиффузионных процессов с увеличением объемной доли пустот при высоких скоростях сдвига [14].

Вычислительный эксперимент по исследованию влияния структурных и кинематических параметров гравитационного потока на динамику сепарации частиц по плотности проведен с использованием монодисперсной смеси частиц размером 3,375 мм, состоящую из двух фракций плотностью 2500 кг/м³ (88 %) и плотностью 4000 кг/м³ (12 %). Результаты исследования, полученные в работах [6, 14, 15], свидетельствуют о доминирующей роли эффекта квазидиффузионной сепарации в процессе сепарации частиц по плотности в быстром гравитационном потоке. Поскольку движущей силой квазидиффузионной сепарации является градиент среднего расстояния между частицами в потоке, то в качестве варьируемой характеристики гравитационного течения в исследовании выбрана форма профиля неоднородности распределения твердой фазы и параметры распределения. В эксперименте использованы профили распределения объемной доли твердой фазы трех типов: 1) гиперболические (рис. 4); 2) параболические вогнутые (рис. 5); 3) параболические выпуклые (рис. 6). Для названных профилей с различными градиентами объемной доли твердой фазы с использованием уравнения (6) получены соответствующие профили скорости частиц в направлении сдвига. На рисунках 4 – 6 представлены совокупности профилей, характеризующих структурно-кинематические свойства быстрых гравитационных течений зернистого материала, для трех вышеназванных форм распределений объемной доли твердой фазы.

С использованием совокупности профилей (см. рис. 4 – 6) определялись структурно-кинематические параметры гравитационных потоков, и на базе уравнения (7) при граничных и начальных условиях (8) и (9) моделировалась динамика сепарации частиц по плотности. Моделирование проводилось путем интегрирования уравнения (7) численным методом с использованием конечно-разностной схемы Кранка–Николсон [13]. В целях анализа степени влияния различных эффектов сепарации на динамику процесса моделирование проводилось по трем вариантам: 1) с учетом только эффекта квазидиффузионной сепарации; 2) с уче-

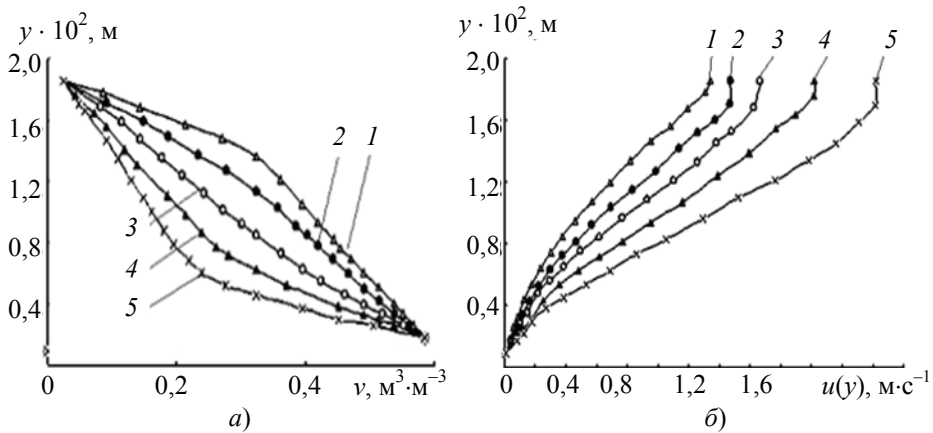


Рис. 4. Виртуальные профили объемной доли твердой фазы $v(y)$ гиперболической формы (а) и осредненных значений поступательной скорости $u(y)$ (б) в быстром гравитационном потоке бисера при $v(0)$ в центральной части слоя, равной: 1 – 0,44; 2 – 0,375; 3 – 0,3; 4 – 0,23; 5 – 0,175

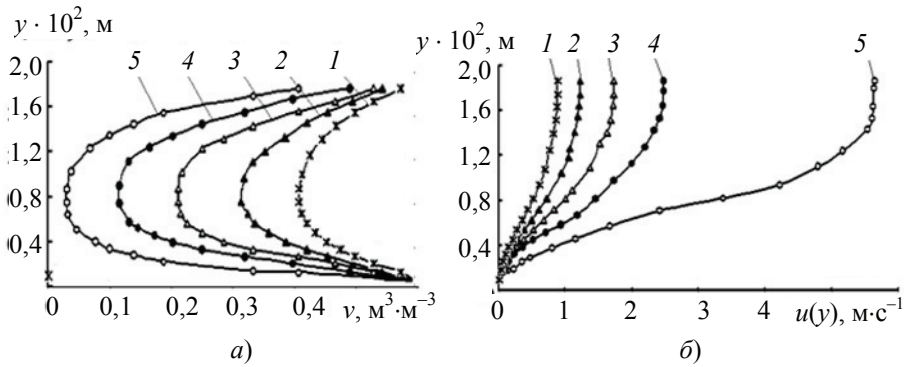


Рис. 5. Виртуальные профили объемной доли твердой фазы $v(y)$ параболической вогнутой формы (а) и осредненных значений поступательной скорости $u(y)$ (б) в быстром гравитационном потоке бисера при $v(0)$ в центральной части слоя, равной: 1 – 0,4; 2 – 0,3; 3 – 0,2; 4 – 0,1; 5 – 0,01

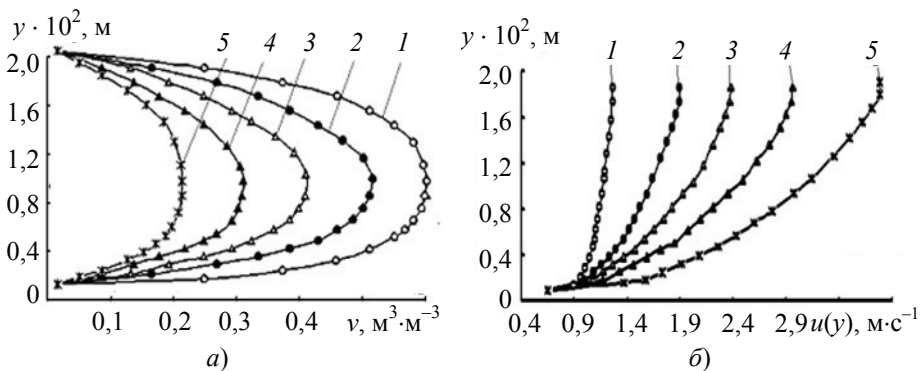


Рис. 6. Виртуальные профили объемной доли твердой фазы $v(y)$ параболической выпуклой формы (а) и осредненных значений поступательной скорости $u(y)$ (б) в быстром гравитационном потоке бисера при $v(0)$ в центральной части слоя, равной: 1 – 0,58; 2 – 0,5; 3 – 0,4; 4 – 0,3; 5 – 0,2

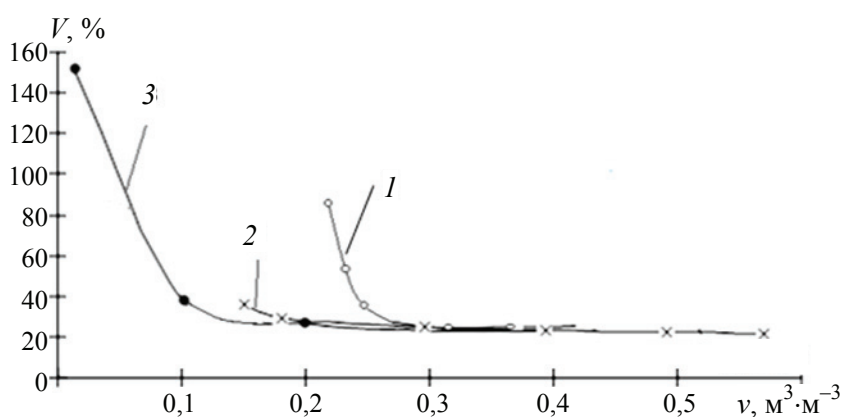


Рис. 7. Коэффициент вариации как функция объемной доли твердой фазы в центральной части слоя для трех типов профилей ее распределений в потоке:
 1 – гиперболический; 2 – параболический выпуклый; 3 – параболический вогнутый

том только эффекта сегрегации; 3) при комплексном учете названных эффектов сепарации. В результате установлено, что во всех случаях моделирования доминирующая роль в процессе сепарации по плотности принадлежит эффекту квазидиффузионной сепарации.

По результатам моделирования распределений концентрации неоднородных частиц, рассчитаны коэффициенты вариации концентрации по формуле (7), которые использованы для характеристики эффективности сепарации. Зависимости коэффициента вариации от объемной доли твердой фазы в центральной части потока для трех форм профилей ее распределений приведены на рис. 7.

Полученные результаты позволяют сделать однозначный вывод о том, что для всех форм профилей распределений объемной доли твердой фазы увеличение градиента концентрации твердой фазы сопровождается возрастанием коэффициента вариации. Это является еще одним подтверждением доминирующей роли эффекта квазидиффузионной сепарации в формировании распределений концентрации частиц различной плотности в широком диапазоне изменения структурно-кинематических параметров быстрых гравитационных течений. Наиболее высокая неоднородность распределения концентрации частиц различной плотности в гравитационном потоке (коэффициент вариации) наблюдается при параболическом вогнутом профиле распределения объемной доли твердой фазы, а наименьшая – при параболическом выпуклом. Наблюдаемый эффект, очевидно, связан с противоположным направлением градиента объемной доли твердой фазы в случаях выпуклого и вогнутого профилей распределений. Поскольку средние по объему слоя значения движущей силы квазидиффузионной сепарации, пропорциональные градиенту объемной доли твердой фазы, примерно одинаковы для случаев выпуклого и вогнутого профилей, то причиной различной кинетики может быть различная диффузионная проницаемость среды в альтернативных условиях ее течения. Диффузионная проницаемость среды пропорциональна скорости флуктуаций частиц и среднему расстоянию между ними (дилатансии) [9]. Поскольку скорость флуктуаций частиц в сдвиговом потоке пропорциональна скорости сдвига, а дилатансия среды увеличивается пропорционально квадрату скорости сдвига (6), то, согласно профилям скорости, представленным на рис. 5 и 6, более высокой склонностью к диффузионному прониканию характеризуется поток с параболическим вогнутым профилем объемной доли твердой фазы.

Полученные результаты исследования позволяют использовать их в качестве научной базы для разработки технологических решений по организации процессов переработки зернистых материалов. В зависимости от отличительных свойств частиц и их концентрации в смеси, определяются гидродинамические условия их взаимодействия в быстром гравитационном потоке, обеспечивающие достижение необходимого технологического эффекта.

Список литературы

1. Иванов, О. О. Управление сегрегированными потоками сыпучих материалов для их обработки методами разделения и соединения / О. О. Иванов, В. А. Пронин, Е. А. Рябова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 3. – С. 397 – 410. doi: 10.17277/vestnik.2016.03.pp.397-410
2. Dolgunin, V. N. Characteristics of Continuous Granular Materials Mixer with Pulse Action on Segregated Flow of Batch-Dosed Component / V. N. Dolgunin, O. O. Ivanov, V. A. Pronin, E. A. Ryabova // Chemical and Petroleum Engineering. – 2018. – Vol. 54, No. 3-4. – P. 143 – 149. doi:10.1007/s10556-018-0453-8
3. Долгунин, В. Н. К разработке технологии и аппаратурного оформления производства субстрата из целлюлозосодержащего сырья / В. Н. Долгунин, А. В. Слепых, В. А. Пронин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2019. – Т. 25, № 4. – С. 595 – 602. doi: 10.17277/vestnik.2019.04.pp.595-602
4. Долгунин, В. Н. Кинетические закономерности биоконверсии целлюлозосодержащего сырья с использованием культуры микроскопического гриба / В. Н. Долгунин, А. В. Слепых, В. А. Пронин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2020. – Т. 26, № 3. С. 393 – 401. doi: 10.17277/vestnik.2020.03.pp.393-401
5. Долгунин, В. Н. Кинетика и гидродинамические условия твердофазной биоконверсии целлюлозосодержащего сырья в статико-динамическом режиме / В. Н. Долгунин, Д. А. Власов, В. А. Пронин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2022. – Т. 28, № 2. – С. 269 – 278. doi: 10.17277/vestnik.2022.02.pp.269-278
6. Долгунин, В. Н. Структурная неоднородность и эффекты сепарации по размеру и плотности при гравитационном течении зернистых материалов / В. Н. Долгунин, А. Н. Куди, А. Г. Тараканов // Инженерно-физический журнал. – 2022. – Т. 95, № 2. – С. 492 – 503.
7. Долгунин, В. Н. Механизмы и кинетика гравитационной сепарации гранулированных материалов / В. Н. Долгунин, А. Н. Куди, М. А. Туев // Успехи физических наук. – 2020. – Т. 190, № 6. – С. 585 – 604. doi: 10.3367/UFN.2020.01.038729
8. Brennen, C. E. Fundamentals of Multiphase Flows. – Cambridge : Cambridge University Press, 2005. – 410 p. doi: 10.1017/CBO9780511807169
9. Ferziger, J. H. Mathematical Theory of Transport Processes in Gases / J. H. Ferziger, H. G. Kaper. – Amsterdam : North-Holland Publ., 1972. – 568 p.
10. Dolgunin, V. N. Rapid Granular Flows on a Vibrated Rough Chute: Behavior Patterns and Interaction Effects of Particles / V. N. Dolgunin, A. N. Kudi, A. A. Ukolov, M. A. Tudev // Chemical Engineering Research and Design. – 2017. – Vol. 122, No. 5. – P. 22 – 32. doi: 10.1016/j.cherd.2017.03.038
11. Борщев, В. Я. Феноменологический анализ взаимодействия неэластичных несвязных частиц в быстром гравитационном потоке / В. Я. Борщев, В. Н. Долгунин, П. А. Иванов // Теоретические основы химической технологии. – 2008. – Т. 42, № 3. – С. 343 – 347
12. Dolgunin, V. N. Development of the Model of Segregation of Particles Undergoing Granular Flow Down on Inclined Chute / V. N. Dolgunin, A. N. Kudy, A. A. Ukolov // Powder Technology. 1998. – Vol. 96, No. 3. – P. 211 – 218. doi: 10.1016/S0032-5910(97)03376-7

13. Marchuk, G. I. *Methods of Numerical Mathematics. Applications of Mathematics 2*. Berlin – Heidelberg – New York : Springer-Verlag, 1975. XII. – 316 p.

14. Куди, А. Н. Мультифракционное сепарирование различающихся по форме и плотности полидисперсных частиц / А. Н. Куди, Н. А. Федосов, В. В. Сергеев, А. Г. Тараканов, В. А. Пронин // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та.* – 2021. – Т. 27, № 2. – С. 285 – 293. doi: 10.17277/vestnik.2021.02.pp.285-293

15. Dolgunin, V. N. Organization of Mixing Process of Granular Materials with Portion Dosage of Some Components / V. N. Dolgunin, O. O. Ivanov, A. A. Ukolov, V. A. Pronin, E. A. Ryabova // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та.* – 2012. – Т. 18, № 1. – С. 108 – 114.

The Influence of the Structural and Kinematic Characteristics of the Gravitational Flow of a Grain Medium on the Effects of Separation by Size and Density

O. O. Ivanov¹, A. G. Tarakanov², K. A. Kudi³, V. N. Dolgunin²

*Department of Technologies and Equipment of Food and Chemical Industries (2),
dolgunin-vn@yandex.ru, TSTU, Tambov, Russia;
CB “Renaissance Credit” (LLC) (3), Tambov, Russia*

Keywords: gravitational flow; granular material; math modeling; separation by size and density.

Abstract: A mathematical model of the dynamics of separation of particles by size and density in a fast gravitational flow is used to study the influence of its structural and kinematic characteristics on the efficiency of the process. It has been established that the separation efficiency of coarse particles increases with increasing shear rate, reaching limiting values at a shear strain rate of $(80 \pm 5) \text{ s}^{-1}$. This is explained by the dominance of segregation at high values of shear rate and solid phase concentration, which gradually passes to quasi-diffusion effects of separation and mixing with an increase in the volume fraction of voids in the flow. The influence of the inhomogeneity of the distribution of the concentration of the solid phase for various variants of the shape of the distribution profiles in the shear flow on the density separation intensity is studied. It has been established that the highest density separation efficiency is achieved when a parabolic concave solid phase concentration profile is formed in the flow as a result of an increase in the driving force of quasi-diffusion separation and the opposite direction of separation flows to the central part of the layer.

References

1. Ivanov O.O., Pronin V.A., Ryabova Ye.A. [Control of segregated flows of bulk materials for their processing by separation and connection methods], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 3, pp. 397-410. doi: 10.17277/vestnik.2016.03.pp.397-410 (In Russ., abstract in Eng.).

2. Dolgunin V.N., Ivanov O.O., Pronin V.A., Ryabova E.A. Characteristics of continuous granular materials mixer with pulse action on segregated flow of batch-dosed component, *Chemical and Petroleum Engineering*, 2018, vol. 54, No. 3-4, pp. 143-149. doi:10.1007/s10556-018-0453-8

3. Dolgunin V.N., Slepikh A.V., Pronin V.A. [On the development of technology and instrumentation for the production of a substrate from cellulose-containing raw materials], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2019, vol. 25, no. 4, pp. 595-602. doi: 10.17277/vestnik.2019.04.pp.595-602 (In Russ., abstract in Eng.).

4. Dolgunin V.N., Slepikh A.V., Pronin V.A. [Kinetic patterns of bioconversion of cellulose-containing raw materials using a microscopic fungus culture], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2020, vol. 26, no. 3, pp. 393-401. doi: 10.17277/vestnik.2020.03.pp.393-401 (In Russ., abstract in Eng.).

5. Dolgunin V.N., Vlasov D.A., Pronin V.A. [Kinetics and hydrodynamic conditions of solid-phase bioconversion of cellulose-containing raw materials in static-dynamic mode], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2022, vol. 28, no. 2, pp. 269-278. doi: 10.17277/vestnik.2022.02.pp.269-278 (In Russ., abstract in Eng.).

6. Dolgunin V.N., Kudi A.N., Tarakanov A.G. Structural Inhomogeneity and Effects of Separation by Size and Density in Gravity Flow of Granular Materials, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2022, vol. 95, no. 2, pp. 484-494. doi: 10.1007/s10891-022-02505-y

7. Dolgunin V.N., Kudi A.N., Tuev M.A. Mechanisms and Kinetics of Gravity Separation of Granular Materials, *Physic-Uspekhi*, 2020, vol. 63, no. 6, pp. 545-561. doi: 10.3367/UFNe.2020.01.038729

8. Brennen C. E. *Fundamentals of Multiphase Flows*, Cambridge: Cambridge University Press, 2005, 410 p. doi: 10.1017/CBO9780511807169

9. Ferziger J.H., Kaper H.G. *Mathematical Theory of Transport Processes in Gases*, Amsterdam: North-Holland Publ., 1972, 568 p.

10. Dolgunin V.N., Kudi A.N., Ukolov A.A., Tuev M.A. Rapid Granular Flows on a Vibrated Rough Chute: Behavior Patterns and Interaction Effects of Particles, *Chemical Engineering Research and Design*, 2017, vol. 122, no. 5, pp. 22-32. doi: 10.1016/j.cherd.2017.03.038

11. Borschov V.Ya., Dolgunin V.N., Ivanov P.A. Phenomenological Analysis of the Interaction of Nonelastic Incoherent Particles in a Rapid Gravity Flow, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2008, vol. 42, no. 3, pp. 331-335. doi: 10.1134/S0040579508030147

12. Dolgunin V.N., Kudy A.N., Ukolov A.A. Development of the Model of Segregation of Particles Undergoing Granular Flow Down on Inclined Chute, *Powder Technology*, 1998, vol. 96, no. 3, pp. 211-218. doi: 10.1016/S0032-5910(97)03376-7

13. Marchuk G. I. *Methods of Numerical Mathematics. Applications of Mathematics 2*. Berlin-Heidelberg-New York: Springer-Verlag, 1975. XII. 316 p.

14. Kudi A.N., Fedosov N.A., Sergeev V.V., Tarakanov A.G., Pronin V.A. [Multifractional separation of polydisperse particles differing in shape and density], 2021, vol. 27, no. 2, pp. 285-293. doi: 10.17277/vestnik.2021.02.pp.285-293 (In Russ., abstract in Eng.).

15. Dolgunin V.N., Ivanov O.O., Ukolov A.A., Pronin V.A., Ryabova E.A. Organization of mixing process of granular materials with portion dosage of some components, *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 1, pp. 108-114. (abstract in Russ.).

Einfluss der strukturellen und kinematischen Eigenschaften der Gravitationsströmung des Kornmediums auf die Auswirkungen der Trennung nach Größe und Dichte

Zusammenfassung: Das mathematische Modell der Dynamik der Trennung von Partikeln nach Größe und Dichte in einer schnellen Gravitationsströmung ist verwendet, um den Einfluss seiner strukturellen und kinematischen Eigenschaften auf die Effizienz des Prozesses zu untersuchen. Es ist festgestellt, dass die Separierungsleistung von großen Partikeln mit zunehmender Schergeschwindigkeit zunimmt und bei der

Scherverformungsgeschwindigkeit von $(80 \pm 5) \text{ s}^{-1}$ Grenzwerte erreicht. Dies erklärt sich durch die Dominanz der Segregation bei hohen Werten der Schergeschwindigkeit und Festphasenkonzentration, die allmählich zu Quasi-Diffusionseffekten der Trennung und Vermischung mit einer Zunahme des Volumenanteils von Hohlräumen in der Strömung übergeht. Es ist der Einfluss der Inhomogenität der Konzentrationsverteilung der Festphase für verschiedene Varianten der Form der Verteilungsprofile in der Scherströmung auf die Intensität der Dichtentrennung untersucht. Es ist festgestellt, dass die höchste Dichteabscheidungseffizienz bei der Bildung in dem Strom des parabolischen konkaven Profils der Festphasenkonzentration infolge der Erhöhung der Antriebskraft der Quasidiffusionsabscheidung und der entgegengesetzten Richtung der Trennströme in den zentralen Teil der Schicht erreicht wird.

Influence des caractéristiques structurelles et cinématiques du flux gravitationnel du milieu granulaire sur les effets de séparation en taille et en densité

Résumé: Pour étudier l'influence de ses caractéristiques structurelles et cinématiques sur l'efficacité du processus est utilisé le modèle mathématique de la dynamique de séparation des particules en termes de mesure et de densité dans un flux gravitationnel rapide. Est établi que l'efficacité de la séparation des impuretés de grosses particules augmente avec l'augmentation du taux de cisaillement, atteignant les valeurs limites à un taux de déformation au cisaillement $(80 \pm 5) \text{ s}^{-1}$. Cela s'explique par la prédominance de la ségrégation à des taux de cisaillement élevés et à la concentration en phase solide, qui passe progressivement aux effets de quasi-diffusion de la séparation et du mélange avec l'augmentation de la fraction volumique des vides dans le flux. Est étudié l'effet de l'hétérogénéité de la distribution de la concentration en phase solide pour de différentes variantes de la forme des profils de distribution dans le flux de cisaillement sur l'intensité de la séparation en fonction de la densité. Est établi que l'efficacité de séparation de densité la plus élevée est obtenue lors de la formation d'un profil concave parabolique de concentration en phase solide dans le flux en raison de l'augmentation de la force motrice de la séparation de quasi-diffusion et de la direction opposée des flux de séparation dans la partie centrale de la couche.

Авторы: *Иванов Олег Олегович* – кандидат технических наук, самозанятый, Тамбов, Россия; *Тараканов Александр Геннадиевич* – аспирант кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»; *Куди Константин Андреевич* – главный финансовый аналитик, КБ «Ренессанс Кредит» (ООО), Тамбов, Россия; *Долгунин Виктор Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ФЕНТОН-ОКИСЛЕНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ СТОЧНЫХ ВОД СЫРНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

М. А. Промтов¹, О. А. Шеина²

*Кафедра «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность» (1),
promtov.ma@mail.tstu.ru, ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия;*

*кафедра «Химия и технология органических веществ» (2),
ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт
органической химии и технологии», Москва, Россия*

Ключевые слова: метод фентон-окисления; молочная сыворотка; очистка сточных вод.

Аннотация: Исследована эффективность предварительной обработки сточных вод сырного производства окислителем Фентона. Отмечено существенное снижение показателей химического потребления кислорода, биологического потребления кислорода за 5 суток, содержания жиров в обработанной молочной сыворотке, являющейся основным компонентом сточных вод сырного производства. Предложена последовательность введения реагентов для достижения значительного ряда показателей качества сточных вод, не превышающих ПДК.

Введение

За последнее десятилетие производство сыров и сырной продукции в России показывает стабильный рост. Однако наряду с положительной динамикой в отрасли производители сталкиваются с проблемой утилизации побочного продукта – молочной сыворотки. Часть производителей решает проблему, перерабатывая сыворотку и реализуя образующиеся продукты.

Промышленная переработка молочной сыворотки осуществляется по трем основным направлениям: полное использование всех компонентов сыворотки (напитки свежие и сквашенные, сгущенные и сухие продукты и др.); раздельное использование компонентов сырья (извлечение жира, белков, лактозы и др.); получение производных компонентов молочной сыворотки (гидролизаты сывороточных белков, глюкозо-галактозные сиропы, лактулоза и др.). Для переработки сыворотки применяют сгущение, сушку, электромембранные (электродиализ, электроактивация) и баромембранные процессы (ультрафильтрация, нанофильтрация, обратный осмос) [1, 2]. Данный технологический этап тем не менее сопровождается образованием больших объемов сточных вод, требующих утилизации.

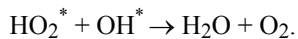
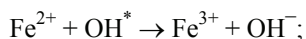
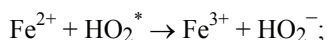
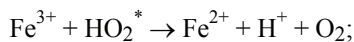
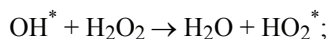
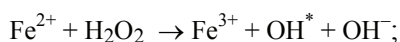
Проблема утилизации сточных вод еще более остро стоит перед производителями, которые в силу определенных причин не занимаются промышленной переработкой молочной сыворотки. Стоки предприятий по производству молочной и сырной продукции характеризуются высоким содержанием органических веществ, низким уровнем рН среды и, как следствие, не могут сбрасываться в систему бытовой канализации из-за высокой степени загрязненности и агрессивности. Следовательно, перед сбросом такие воды должны проходить обязательную предварительную обработку.

Высокое содержание органических веществ в сыворотке влияет на такие показатели качества сточных вод, как химическое и биологическое потребление ки-

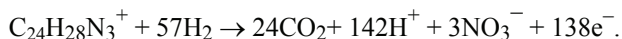
слорода. Химическое потребление кислорода (ХПК) выражается в миллиграммах кислорода (или другого окислителя в пересчете на кислород), пошедшего на окисление органических веществ, содержащихся в литре (1 дм³) воды [4]. Следовательно, снижения ХПК можно достичь, окислив содержащиеся в сыворотке органические вещества. Одним из распространенных и относительно чистых с точки зрения экологии окислителей является пероксид водорода [5]. Однако в чистом виде данный окислитель недостаточно эффективен для систем с высокими концентрациями загрязнителей [5, 6]. Ряд исследований посвящен поиску окислителя, оказывающего незначительную нагрузку на окружающую среду, но способного окислить большинство загрязнителей в сточных водах. Многие исследователи в качестве такого окислителя рассматривают реактив Фентона [6 – 12] или подобные ему реактивы [13, 14], а также сочетание химической обработки реактивом Фентона и его аналогами с некоторыми физическими методами [13, 15 – 18].

Так, в литературе [5, 10] отмечено значительное снижение ХПК в сточных водах производства тринитрорезорцината свинца при использовании реагента Фентона. Эффективность данного окислителя для удаления широкого ряда органических загрязнителей сточных вод показана в [7 – 9].

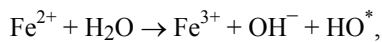
Фентоновское окисление метилового фиолетового в водном растворе описано в [11], где был предложен механизм окислительно-восстановительной реакции в виде последовательности уравнений:



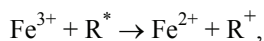
Общее уравнение окисления метилового фиолетового имеет вид



Данный механизм коррелирует с механизмом, предложенным в [12], где исследователи предположили, что разложение пероксида водорода сопровождается образованием гидроксильных радикалов



а в основе действия реактива Фентона лежит сорбция или связывание растворенных красителей в сточных водах



где R^{*} – органический радикал.

Механизм реакции Фентона подробно рассмотрен в [19]: он включает семь стадий с участием радикальных частиц различного состава. В качестве наиболее стабильной частицы указан гидроксильный радикал, который может реагировать со многими классами органических соединений.

В литературе [13] дано описание влияния структуры молекул органических загрязнителей на эффективность удаления органического углерода в результате реакций окисления. Кроме того, в данной работе показано, что удаление общего

органического углерода при обработке с использованием процесса O_3 –УФ– TiO_2 сопровождалось кинетикой псевдонулевого порядка.

В источнике [14] приведено сравнение кинетики реакций обесцвечивания сточных вод реактивом Фентона и его аналога, содержащего Fe^{3+}/H_2O_2 . Скорость деградации загрязнителей сильно зависела от начальной концентрации Fe^{2+} или Fe^{3+} , начальной концентрации H_2O_2 и начального pH. Температура реакции (15 – 45 °С) мало влияла на общую скорость окисления красителя в фентоноподобной реакции. В работе также отмечено, что реакция, подобная реакции Фентона, следует сравнительно более простой кинетике псевдопервого порядка, в отличие от реакции Фентона.

Ряд работ посвящен сочетанию физических и химических методов при обработке сточных вод с применением реактива Фентона. В статье [15] рассмотрено гетерогенное фентоноподобное окисление тетрациклина с помощью ультразвука на магнетитовом катализаторе. Авторы сообщают о 93,6%-й эффективности удаления тетрациклина и снижении содержания общего органического углерода до 31,8 %. Они связывают данные эффекты со стабильностью катализатора, обработанного ультразвуком.

Улучшение качества очистки сточных вод при сочетании ультразвука и реакции Фентона отмечено для сточных вод производства бисфенола А [16, 17] и боеприпасов [18].

Цель статьи – исследование эффективности применения метода, сочетающего фентон-окисление для улучшения показателей качества сточных вод, содержащих молочную сыворотку.

Экспериментальная часть

Для исследования использовали образцы молочной сыворотки, являющейся основным компонентом сточных вод предприятия по производству сыра. Качественный и количественный анализ сыворотки до и после обработки проводили в соответствии с ГОСТ в лаборатории ООО «РКС-ТАМБОВ».

Показатели, по которым образец исходной молочной сыворотки имеет превышения предельно допустимой концентрации (ПДК) [3], приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные показатели качества сточных вод предприятия по производству сыра

Показатель	Значение показателя в сыворотке	ПДК
pH	3,7	6,0...9,0
$[SO_4^{2-}]$, мг/дм ³	197	100
$[Cl^-]$, мг/дм ³	833	129
$[PO_4^{3-}]$, мг/дм ³	200	8,1
ХПК, мг O/дм ³	65 050	500
БПК5, мг/дм ³	53 827	300
Взвешенные вещества, мг/дм ³	3209	300
Содержание жиров, мг/дм ³	53,6	50

Примечание. БПК5 – биологическое потребление кислорода за 5 суток.

Также сыворотка содержит катионы железа, аммония, нитрат- и нитрит-анионы. Эти показатели соответствуют норме.

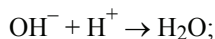
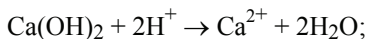
Как следует из табл. 1, в образцах необработанной сыворотки показатели превышают ПДК рН в 1,5 раза, ПДК (SO_4^{2-}) – приблизительно в 2 раза, ПДК (СГ) – в 6,5 раз, ПДК (PO_4^{3-}) – в 25 раз, ПДК взвешенных веществ – в 11 раз, ПДК жиров – в 1,1 раза.

Наибольшее превышение ПДК наблюдается по ХПК – в 130 раз и БПК5 – в 179 раз, в связи с чем в первую очередь были рассмотрены способы обработки сыворотки, приводящие к снижению ХПК и БПК5.

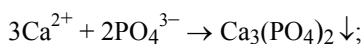
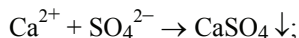
На основании вышеизложенного в качестве основного окисляющего агента молочной сыворотки выбран реактив Фентона. Соотношение компонентов в реактенте подбирали исходя из литературных данных [2]: для обработки сыворотки использовали реактив Фентона, содержащий 50 г/дм³ перекиси водорода и 3 г/дм³ сульфата железа (II).

Следующий этап химической обработки сыворотки предполагал уменьшение ее кислотности до значений рН 6,5...8,5. Для этого целесообразно использовать гидроксид кальция, так как данный реагент участвует не только в реакции нейтрализации, но и в процессах осаждения сульфат- и ортофосфат-анионов, содержащихся в исходной сыворотке. Кроме того, катионы кальция осаждают и сульфат-анионы, добавленные с реактивом Фентона, а гидроксид-ионы принимают участие в осаждении ионов железа. Это общеизвестные реакции:

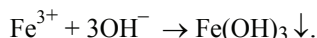
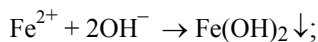
1) нейтрализация сыворотки



2) осаждение сульфат- и ортофосфат-анионов



3) осаждение катионов железа



Последовательность добавления реактивов рекомендована авторами и обусловлена тем, что реактив Фентона более эффективен в кислой среде, поскольку в щелочной среде имеют место конкурирующие процессы – окисление катиона железа Fe^{2+} и гетерогенная реакция осаждения Fe^{2+} гидроксид-ионами.

Для сравнения проведена серия экспериментов, в которых в качестве окислительного агента использовались эквивалентные количества дихромата калия. Выбор обусловлен высокой окисляющей способностью данного вещества в кислой среде без учета негативного влияния дихроматов на окружающую среду.

Обработку молочной сыворотки проводили с интенсивным перемешиваем ленточно-лопастной мешалкой в емкости, последовательно вводя выбранные химические реагенты и коагулянт для увеличения хлопьеобразования.

Результаты лабораторного анализа исходной и обработанной сыворотки по показателям рН, ХПК, БПК5, взвешенные вещества свидетельствуют о зависимости данных показателей от природы окисляющего агента (табл. 2).

Как следует из табл. 2, наиболее существенное снижение ХПК и БПК5 происходит в присутствии реактива Фентона – в 3 и 3,9 раза соответственно. Перекись водорода (37%-й раствор) также уменьшает химическое и биологическое

Таблица 2

**Показатели качества молочной сыворотки
в первой серии экспериментов**

Реагент	ХПК, мгО/дм ³	БПК ₅ , мг/дм ³	Взвешенные вещества, мг/дм ³	рН	Цвет обработанной сыворотки
Исходная сыворотка	65 050	53 827	3209	3,7	Светло-желтый
Ca(OH) ₂ 2 г/дм ³ H ₂ O ₂ (37 %) 150 мл/дм ³ Коагулянт 20 г/дм ³	23 050	22 550	2957	3,3	
K ₂ Cr ₂ O ₇ 12,285 г/дм ³ Коагулянт 20 г/дм ³	54 850	32 018	11 168	3,6	
Ca(OH) ₂ 0,4 г/дм ³ Реактив Фентона	21 800	13 925	1464	2,25	Черно-коричневый

Пр и м е ч а н и е . Состав реактива Фентона – 50 г/дм³ H₂O₂ + 3 г/дм³ FeSO₄ · 7H₂O.

потребление кислорода – в 2,8 и 2,4 раза соответственно, что, вероятно, обусловлено ее меньшей окисляющей способностью по сравнению с реактивом Фентона в условиях эксперимента. Дихромат калия оказался наименее эффективным окислителем, снизив ХПК и БПК₅ в 1,2 и 1,7 раза соответственно.

Содержание взвешенных веществ в сыворотке, обработанной реактивом Фентона, в 2,2 раза ниже, чем в исходной сыворотке, и в 2 раза меньше, чем в образце, обработанном перекисью водорода. Почти трехкратное увеличение содержания взвешенных частиц в сыворотке, обработанной раствором дихромата калия, по сравнению с исходной сывороткой можно объяснить снижением растворимости компонентов рабочего раствора.

Как и предполагалось, подобранный состав реагентов практически не влияет на уровень рН сыворотки при обработке H₂O₂ и K₂Cr₂O₇. Однако снижение рН в сыворотке, обработанной реактивом Фентона, несмотря на присутствие гидроксида кальция требует дополнительного исследования. Можно предположить, что описанный эффект связан с изменениями в органической фазе сыворотки.

Об изменениях в органической фазе косвенно свидетельствует черно-коричневый цвет сыворотки, обработанной реактивом Фентона, а также характерный запах «подгоревшего молока».

В таблице 3 представлены результаты исследования влияния количества добавляемого Ca(OH)₂ и времени экспозиции сыворотки до введения щелочи на уровень рН и другие показатели качества.

Как описано ранее, для приведения уровня рН молочной сыворотки к значениям, не превышающим ПДК, в реакционную смесь вводили гидроксид кальция. Практически одновременное введение реактива Фентона и гидроксида кальция вызывало снижение ХПК и БПК₅, однако кислотность среды при этом повышалась в 1,6 раза по сравнению с исходной сывороткой, что является существенным отклонением от регламентированных значений (см. табл. 2 и 3).

Согласно приведенным данным, отсутствует линейная зависимость значений ХПК и БПК₅ от количества добавляемой щелочи. Так, минимальное значение ХПК наблюдается в сыворотке при практически синхронном введении реактива Фентона и 0,4 г/дм³ Ca(OH)₂ – 21 800 мгО/дм³. Близкие значения (25 600 мгО/дм³)

Таблица 3

**Зависимость показателей качества молочной сыворотки
от количества добавляемой щелочи и времени экспозиции сыворотки,
обработанной реактивом Фентона**

Реагент	Время экспозиции сыворотки, ч	ХПК, мгО/дм ³	БПК ₅ , г/дм ³	Взвешенные вещества, мг/дм ³	рН
Исходная сыворотка	–	65 050	53 827	3209	3,7
Ca(OH) ₂ 0,4 г/дм ³ Реактив Фентона	0	21 800	13 925	1464	2,25
Реактив Фентона Ca(OH) ₂ 3 г/дм ³	2	54 000	16 065	1268	5,5
Реактив Фентона Ca(OH) ₂ 20 г/дм ³	2	35 600	18 690	10080	5,65
	1	25 600	10 432	34356	8,7

Пр и м е ч а н и е . Состав реактива Фентона – 50 г/дм³ H₂O₂ + 3 г/дм³ FeSO₄ · 7H₂O.

получены при добавлении 20 г/дм³ щелочи через 1 ч после обработки реактивом Фентона. Увеличение времени экспозиции до 2 ч приводит к повышению ХПК по сравнению с одночасовой экспозицией (35 600 мгО/дм³).

Наименьшее значение БПК₅ отмечено в сыворотке, обработанной реактивом Фентона, после добавления к ней через 1 ч 20 г/дм³ гидроксида кальция (10 432 мг/дм³), а наибольшее значение БПК₅ (18 690 мг/дм³) – в аналогичных условиях после двухчасовой выдержки.

Также неоднозначна зависимость содержания взвешенных веществ от количества добавленной щелочи и времени экспозиции обработанной сыворотки. При введении 3 г/дм³ щелочи в обработанную сыворотку через 2 часа концентрация взвешенных веществ составляла 1268 мг/дм³. Добавление 20 г/дм³ щелочи через 2 часа соответствует содержанию взвешенных веществ 10 080 мг/дм³, а через 1 час – 34 356 мг/дм³. Очевидно, процессы, происходящие в реакционной смеси, далеки от состояния равновесия и требуют дополнительного исследования.

О нестабильности рассматриваемой системы свидетельствуют и значения рН. С увеличением количества добавляемой щелочи при двухчасовой экспозиции рН увеличивается, но гораздо медленнее, чем можно было ожидать: до 5,5 при 3 г/дм³ щелочи и до 5,65 при 20 г/дм³ гидроксида кальция. Показатель рН при одночасовой экспозиции с последующим добавлением 20 г/дм³ гидроксида кальция равен 8,7, а при двухчасовой экспозиции в тех же условиях – 5,65. Можно предположить наличие в системе комплекса конкурирующих равновесий, в результате которых часть гидроксид-ионов выводится из кислотно-основного взаимодействия и расходуется на образование осадка или на реакции с органическими компонентами раствора.

Таким образом, на основании предварительных экспериментов по обработке молочной сыворотки сделан вывод об эффективности применения реактива Фентона в качестве реагента, снижающего ХПК, БПК₅ и содержание взвешенных веществ. Корректировку рН до величин ПДК следует осуществлять гидроксидом кальция Ca(OH)₂. Содержание взвешенных веществ можно снизить, если перед химической обработкой отфильтровать сыворотку.

В целях изучения влияния состава реактива Фентона на показатели качества обработанной сыворотки в образцы сыворотки объемом 10 л вводились следующие растворы:

- раствор 1 – $12,5 \text{ г/дм}^3 \text{ H}_2\text{O}_2 + 0,75 \text{ г/дм}^3 \text{ FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$;
- раствор 2 – $25 \text{ г/дм}^3 \text{ H}_2\text{O}_2 + 1,5 \text{ г/дм}^3 \text{ FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$;
- раствор 3 – $35 \text{ г/дм}^3 \text{ H}_2\text{O}_2 + 2,1 \text{ г/дм}^3 \text{ FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$;
- раствор 4 – $50 \text{ г/дм}^3 \text{ H}_2\text{O}_2 + 3 \text{ г/дм}^3 \text{ FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$;
- раствор 5 – $70 \text{ г/дм}^3 \text{ H}_2\text{O}_2 + 4,2 \text{ г/дм}^3 \text{ FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$.

Одни образцы химически обрабатывались без фильтрации, другие предварительно отфильтровывались. После обработки реактивом Фентона в сыворотку добавляли гидроксид кальция.

Результаты лабораторного анализа исходной и обработанной сыворотки по показателям pH, ХПК, БПК₅, содержание взвешенных веществ, содержание жиров представлены в табл. 4.

Таблица 4

Показатели качества образцов молочной сыворотки
(обрабатываемый объем – 10 л)

Реагент	ХПК, мгО/дм ³	БПК ₅ , мг /дм ³	Взвешенные вещества, мг/дм ³	Жиры, мг/дм ³	pH	Цвет
Исходная сыворотка 1	65 050	53 827	3209	53,6	3,7	Светло-желтый
<i>Без фильтрации</i>						
Раствор 1 Ca(OH) ₂ 2,5 г/дм ³	64 980	36 184	9062	34,4	6,55	Светло-коричневый
<i>Предварительная фильтрация</i>						
Раствор 1 Ca(OH) ₂ 2,5 г/дм ³	58 840	26 812	6431	21,0	6,6	Светло-коричневый
Исходная сыворотка 2	57 140	29 540	13256	1695	3,8	Светло-желтый
<i>Без фильтрации</i>						
Раствор 2 Ca(OH) ₂ 3,5 г/дм ³	32 920	13 086	1861	15	2,8	Черно-коричневый
<i>Предварительная фильтрация</i>						
Раствор 2 Ca(OH) ₂ 3,5 г/дм ³	17 616	5066	1542	10,6	3,85	Черно-коричневый
Раствор 3 Ca(OH) ₂ 8 г/дм ³	40 492	14 816	–			Светло-желтый
Раствор 4 Ca(OH) ₂ 8 г/дм ³	6583	2920	305	0,5	11	
Раствор 5 Ca(OH) ₂ 8 г/дм ³	12 248	4665	–			

Наиболее активная фаза реакции Фентона в молочной сыворотке проходит, в среднем, через 1 ч после обработки с выделением большого количества газа (пара), пенообразованием и сильным нагревом. Обработанный реактивом Фентона объем молочной сыворотки за несколько секунд разогревается до 80 °С от исходной температуры 12 °С. За счет газонасыщения объем молочной сыворотки многократно увеличивается, что может сопровождаться выбросом реакционной массы.

Обсуждение результатов и выводы

Как следует из табл. 4, предварительная фильтрация сыворотки повышает эффективность фентон-окисления. Так, показатель ХПК в образце сыворотки 1, обработанном реактивом Фентона без фильтрации, практически не изменился, а в отфильтрованном образце уменьшился в 1,1 раза. В неотфильтрованном образце сыворотки 2, подвергшемся химической обработке, ХПК снизился в 1,7 раза, а в аналогичном образце после фильтрации наблюдалось снижение ХПК в 3,2 раза.

Фильтрация влияет и на БПК₅ – в образце сыворотки 1, обработанном реактивом Фентона без фильтрации, показатель БПК₅ уменьшился в 1,5 раза, а в аналогичном отфильтрованном образце – в 2 раза. В неотфильтрованном образце сыворотки 2 после химической обработки показатель БПК₅ снизился в 2,2 раза, а в аналогичном образце после фильтрации наблюдалось снижение БПК₅ в 5,8 раза.

На содержание взвешенных веществ, по-видимому, влияет комплекс факторов, в том числе состав реактива Фентона, которым обрабатывается сыворотка, уровень pH, устанавливающийся после добавления гидроксида кальция, а также состав исходной сыворотки. Поэтому нельзя установить зависимость данного показателя от предварительной фильтрации.

В то же время содержание жиров, уменьшающееся при химической обработке во всех образцах сыворотки, в отфильтрованных образцах снижается более существенно – в отфильтрованном образце сыворотки 1 – в 2,5 раза, а в отфильтрованном образце сыворотки 2 – в 160 раз.

При исследовании влияния состава реактива Фентона на показатели ХПК и БПК₅ в отфильтрованных образцах сыворотки 2, обработанных одинаковым количеством щелочи, не удалось получить значимых зависимостей.

Таким образом, применение фентон-окисления целесообразно при обработке сточных вод предприятий по производству сыра, так как данная реакция в сочетании с интенсивным перемешиванием приводит к снижению показателей ХПК, БПК₅ и содержания жиров. Однако необходимы дополнительные исследования по подбору оптимальных концентраций всех описанных в работе реагентов и условий проведения обработки для достижения показателей качества, не превышающих ПДК.

Список литературы

1. Переработка молочной сыворотки: понятная стратегия, реальные технологии, адекватные инвестиции, востребованные продукты / Д. Н. Володин, М. С. Золоторева, В. К. Топалов [и др.] // Молочная промышленность. – 2015. – № 5. – С. 111 – 116.
2. Короткий, И. А. Современные тенденции в переработке молочной сыворотки / И. А. Короткий, И. Б. Плотников, И. А. Мазеева // Техника и технология пищевых производств. – 2019. – Т. 49, № 2. – С. 227 – 234. doi: 10.21603/2074-9414-2019-2-227-234
3. Об утверждении Правил холодного водоснабжения и водоотведения и внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации : постановление Правительства РФ от 29.07.2013 № 644 (ред. от 22.05.2020). –

Текст : электронный. – URL : [https://rpn.gov.ru/upload/iblock/51e/Постановление Правительства РФ от 29.07.2013 № 644.pdf](https://rpn.gov.ru/upload/iblock/51e/Постановление_Правительства_РФ_от_29.07.2013_№_644.pdf) (дата обращения : 19.01.2023).

4. Лурье, Ю. Ю. Аналитическая химия промышленных сточных вод / Ю. Ю. Лурье. – М. : Химия, 1984. – 448 с.

5. Окислительная очистка сточных вод производства тринитрорезорцината свинца пероксидом водорода / И. Г. Шайхиев, А. М. Зайнуллин, Г. М. Шафигуллина, Р. З. Гильманов // Вестник технологического университета. – 2016. – № 12. – С. 176 – 179.

6. Neyens, E. A Review of Classic Fenton's Peroxidation as an Advanced Oxidation Technique / E. Neyens, J. Baeyens // *Journal of Hazardous Materials*. – 2003. – Vol. 98. – P. 33 – 50. doi:10.1016/S0304-3894(02)00282-0

7. Ghernaout, D. Fenton Technology for Wastewater Treatment: Dares and Trends / D. Ghernaout, N. Elboughdir, S. Ghareba // *Open Access Library Journal*. – 17 January 2020. – Vol. 7, No. 1. – P. 1 – 28. doi: 10.4236/oalib.1106045

8. Pignatello, J. J. Advanced Oxidation Processes for Organic Contaminant Destruction Based on the Fenton Reaction and Related Chemistry / J. J. Pignatello, E. Oliveros, A. MacKay // *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. – 2006. – Vol. 36, No. 1. – P. 1 – 84. doi:10.1080/10643380500326564

9. Chamarro, E. Use of Fenton Reagent to Improve Organic Chemical Biodegradability / E. Chamarro, A. Marco, S. Esplugas // *Water Research*. – 2001. – Vol. 35. – P. 1047 – 1050. doi: 10.1016/S0043-1354(00)00342-0

10. Влияние pH среды на эффективность очистки сточных вод производства тринитрорезорцината свинца в условиях реакции Фентона / А. М. Зайнуллин, Л. Ф. Зайнуллина, Г. М. Шафигуллина [и др.], И. Г. Шайхиев, Е. А. Дмитриева // Вестник технологического университета. – 2017. – № 13. – С. 123 – 127.

11. Hashemian, S. Fenton Oxidation of Methyl Violet in Aqueous Solution / S. Hashemian, M. Tabatabaee, M. Gafari // *Journal of Chemistry*. – 2013. – Article ID 509097. – P. 1 – 6. doi: 10.1155/2013/509097

12. Sarayu, K. Current Technologies for Biological Treatment of Textile Wastewater – A Review / K. Sarayu, S. Sandhya // *Applied Biochemistry and Biotechnology*. – 2012. – Vol. 167, No. 3. – P. 645 – 661.

13. Effects of Advanced Oxidation Processes on the Decomposition Properties of Organic Compounds with Different Molecular Structures in Water / H. Suzuki, S. Yamagiwa, S. Araki, H. Yamamoto // *Journal of Water Resource and Protection*. – 27 July 2016. – Vol. 8, No. 9. – P. 823 – 834. doi: 10.4236/jwarp.2016.89067

14. Wang, S. A Comparative Study of Fenton and Fenton-Like Reaction Kinetics in Decolourisation of Wastewater / S. Wang // *Dyes and Pigments*. – 2008. – Vol. 76. – P. 714 – 720. doi: 10.1016/j.dyepig.2007.01.012

15. Ultrasound-assisted heterogeneous Fenton-like degradation of tetracycline over a magnetite catalyst / L. Hou, L. Wang, S. Royer, H. Zhang // *Journal of Hazardous Materials*. – 25 January 2016. – Vol. 302. – P. 458 – 467. doi: 10.1016/j.jhazmat.2015.09.033

16. Ultrasonic Fenton-Like Catalytic Degradation of Bisphenol a by Ferroferric Oxide (Fe₃O₄) Nanoparticles Prepared from Steel Pickling Waste Liquor / R. Huang, Z. Fang, X. Fang, E. Tsang // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 15 December 2014. – Vol. 436. – P. 258 – 266. doi: 10.1016/j.jcis.2014.08.035

17. Heterogeneous Sono-Fenton Catalytic Degradation of Bisphenol A by Fe₃O₄ Magnetic Nanoparticles under Neutral Condition / R. Huang, Z. Fang, X. Yan, W. Cheng // *Chemical Engineering Journal*. – 15 July 2012. – Vol. 197. – P. 242 – 249. doi: 10.1016/j.cej.2012.05.035

18. Combined Ultrasound and Fenton (US-Fenton) Process for the Treatment of Ammunition Wastewater / Y. Li, W.-P. Hsieh, R. Mahmudov, X. Wei, C.P. Huang // *Journal of Hazardous Materials*. – 15 January 2013. – Vol. 244 – 245. – P. 403 – 411. doi: 10.1016/j.jhazmat.2012.11.022

19. Реутов, О. А. Органическая химия. Ч. 2: учебник / О. А. Реутов, А. Л. Курц, К. П. Бутин. – М. : Изд-во МГУ, 1999. – 624 с.

Application of the Fenton Oxidation Method for Cheese Production Wastewater Treatment

М. А. Promptov¹, О. А. Sheina²

*Departments of Technological Processes, Devices and Technosphere Safety (1),
promptov.ma@mail.tstu.ru, TSTU, Tambov, Russia;*

*Department of Chemistry and Technology of Organic Substances (2),
State Scientific Research Institute of Organic Chemistry and Technology,
Moscow, Russia*

Keywords: combined wastewater treatment; Fenton oxidation method; milk whey.

Abstract: The efficiency of pre-treatment of cheese production wastewater with Fenton's oxidizer has been investigated. A significant decrease in chemical oxygen demand, biological oxygen demand for 5 days, fat content in processed whey, which is the main component of cheese production wastewater, was observed. A sequence of reagent addition is proposed to achieve values of a number of wastewater quality indicators that do not exceed the threshold limit value.

References

1. Volodin D.N., Zolotoreva M.S., Topalov V.K., Evdokimov I.A., Khramtsov A.G., Mertin P. [Whey processing: clear strategy, real technologies, adequate investments, demanded products], *Molochnaya promyshlennost* [Dairy industry], 2015, no. 5, pp. 111-116 (In Russ., abstract in Eng.).

2. Korotkiy I.A., Plotnikov I.B., Mazeeva I.A. [Current trends in whey processing], *Tekhnika i tekhnologiya pishhevyykh proizvodstv* [Equipment and technology of food production], 2019, vol. 49, no. 2, pp. 227-234. doi: 10.21603/2074-9414-2019-2-227-234 (In Russ., abstract in Eng.).

3. [On approval of the Rules for cold water supply and sanitation and on amendments to some acts of the Government of the Russian Federation (edition 22.05.2020)], [Decree of the Government of the Russian Federation], 29.07.2013, no. 644. URL: https://rpn.gov.ru/upload/iblock/51e/Постановление_Правительства_РФ_от_29.07.2013_№_644.pdf (accessed 19 January 2023) (In Russ.).

4. Lur'ye Yu.Yu. *Analiticheskaya khimiya stochnykh vod* [Analytical chemistry of industrial wastewater], Moscow: Khimiya, 1984, 448 p. (In Russ.).

5. Shakhiev I.G., Zaynulin A.M., Shafigulina G.M., Gil'ymanov R.Z. [Oxidative treatment of wastewater from the production of lead trinitroresorcinate with hydrogen peroxide], *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Technological University], 2016, no. 12, pp. 176-179. (In Russ., abstract in Eng.)

6. Neyens E., Baeyens J. A review of classic Fenton's peroxidation as an advanced oxidation technique, *Journal of Hazardous Materials*, 2003, vol. 98, pp. 33-50. doi: 10.1016/S0304-3894(02)00282-0

7. Ghernaout D., Elboughdiri N., Ghareba S. Fenton technology for wastewater treatment: dares and trends, *Open Access Library Journal*, 2020, vol. 7, no. 1, January 17, pp. 1-28. doi: 10.4236/oalib.1106045

8. Pignatello J.J., Oliveros E. and MacKay A. Advanced oxidation processes for organic contaminant destruction based on the fenton reaction and related chemistry, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2006, vol. 36, no. 1, pp. 1-84. doi:10.1080/10643380500326564
9. Chamarro E., Marco A. and Esplugas S. Use of fenton reagent to improve organic chemical biodegradability, *Water Research*, 2001, vol. 35, pp. 1047-1050. doi: 10.1016/S0043-1354(00)00342-0
10. Zaynulin A.M., Zaynulina L.F., Shafigulina G.M., Shaykhiev I.G., Dmitrieva E.A. [Influence of the pH of the medium on the efficiency of wastewater treatment of lead trinitroresorcinate production under Fenton reaction conditions], *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Technological University], 2017, no. 13, pp. 123-127 (In Russ.).
11. Hashemian S., Tabatabaee M., Gafari M. Fenton oxidation of methyl violet in aqueous solution, *Journal of Chemistry*, 2013: Article ID 509097, pp. 1-6. doi: 10.1155/2013/509097
12. Sarayu K., Sandhya S. Current technologies for biological treatment of textile wastewater – a review, *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2012, vol. 167, no. 3, pp. 645-661.
13. Suzuki H., Yamagiwa S., Araki S., Yamamoto H. Effects of advanced oxidation processes on the decomposition properties of organic compounds with different molecular structures in water, *Journal of Water Resource and Protection*, 27 July, 2016, vol. 8, no. 9. doi: 10.4236/jwarp.2016.89067
14. Wang, S. A comparative study of fenton and Fenton-like reaction kinetics in decolourisation of wastewater, *Dyes and Pigments*. 2008, vol. 76, pp. 714-720. doi: 10.1016/j.dyepig.2007.01.012
15. Hou L., Wang L., Royer S., Zhang H. Ultrasound-assisted heterogeneous Fenton-like degradation of tetracycline over a magnetite catalyst, *Journal of Hazardous Materials*. 25 January, 2016, vol. 302, pp. 458-467. doi: 10.1016/j.jhazmat.2015.09.033
16. Huang R., Fang Z., Fang X., Tsang E. Ultrasonic Fenton-like catalytic degradation of bisphenol a by ferroferric oxide (Fe₃O₄) nanoparticles prepared from steel pickling waste liquor, *Journal of Colloid and Interface Science*. 15 December, 2014, vol. 436. pp. 258-266. doi: 10.1016/j.jcis.2014.08.035
17. Huang R., Fang Z., Yan X., Cheng W. Heterogeneous sono-Fenton catalytic degradation of bisphenol a by Fe₃O₄ magnetic nanoparticles under neutral condition, *Chemical Engineering Journal*. 15 July, 2012, vol. 197, pp. 242-249. doi: 10.1016/j.cej.2012.05.035
18. Li Y., Hsieh W.-P., Mahmudov R., Wei X., Huang C.P. Combined ultrasound and Fenton (US-Fenton) process for the treatment of ammunition wastewater, *Journal of Hazardous Materials*. 15 January, 2013, vol. 244-245, pp. 403-411. doi: 10.1016/j.jhazmat.2012.11.022
19. Reutov O.A., Kurtc A.L., Butin K.P. *Organicheskaya khimiya. P.2: Uchebnik* [Organic Chemistry. Part 2: Textbook], Moscow: MSU Publishing House, 1999. 624 p. (In Russ.)

Anwendung der Fenton-Oxidationsmethode für die Abwasserbehandlung von Käseproduktionen

Zusammenfassung: Es ist die Effizienz der Vorbehandlung von Abwasser aus Käseproduktion mit dem Oxidationsmittel von Fenton untersucht. Es ist ein signifikanter Rückgang der Indikatoren des chemischen Sauerstoffverbrauchs, des biologischen Sauerstoffverbrauchs für 5 Tage und des Fettgehalts in verarbeiteter Molke festgestellt,

die der Hauptbestandteil des Abwassers der Käseproduktion ist. Eine Reihenfolge der Einführung von Reagenzien ist vorgeschlagen, um Werte für eine Reihe von Abwasserqualitätsindikatoren zu erreichen, die die MPC nicht überschreiten.

Application de la méthode d'oxydation fenton pour le traitement des eaux usées

Résumé: Est étudiée l'efficacité du prétraitement des eaux usées de la production de fromage avec l'oxydant Fenton. Est marquée un diminution considerable de la consommation chimique d'oxygène, une consommation biologique d'oxygène pendant 5 jours et une teneur en matières grasses du lactosérum transformé, ce qui est la principale composante des eaux usées de la production de fromage. Est proposée une séquence d'administration de réactifs pour atteindre un certain nombre d'indicateurs de qualité des eaux usées qui ne dépassent pas la concentration maximum tolérable.

Авторы: *Промтов Максим Александрович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», декан факультета международного образования, ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия; *Шейна Ольга Александровна* – кандидат химических наук, доцент кафедры «Химия и технология органических веществ», ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт органической химии и технологии», Москва, Россия.

**АГРЕГАТЫ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ СМЕСИ
ИЗ КОМПОНЕНТОВ, СКЛОННЫХ К СЕГРЕГАЦИИ:
СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ. ЧАСТЬ II**

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 реализации этих способов. На примере ленточных дозаторов и дозаторов, реализующих технологию Loss-in-Weight, 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, и сделан вывод о перспективности данной технологии с точки зрения повышения точности дозирования. Намечены пути совершенствования двухстадийной технологии дозирования и устройств для ее реализации. Установлено, что поскольку точность дозирования влияет на качество готовой смеси, необходимо рассматривать процессы дозирования компонентов и их смешивание совместно с учетом взаимосвязи данных процессов.

Сегрегация сыпучих материалов

Прежде чем анализировать способы смешивания сыпучих материалов и устройства для реализации этих способов [1, 2], необходимо рассмотреть явление сегрегации, поскольку это процесс диаметрально противоположный процессу смешивания. В переводе с латинского, «сегрегация» (segregatio) имеет несколько значений: отделение, обособление, удаление, разделение. Применительно к процессу смешивания наиболее точно термину сегрегация соответствуют значения разделение и обособление, поскольку конечным результатом сегрегации является разделение частиц по физико-механическим свойствам в рабочем объеме смеси-теля и образование зон с повышенной концентрацией частиц, имеющих одинаковые свойства. Причиной сегрегации может быть различие частиц по размеру, плотности, форме, шероховатости, упругости, коэффициентам трения, адгезионным и другим физико-механическим свойствам. Одной из первых научных публикаций является статья [3], где рассмотрена сегрегация частиц на свободной поверхности во время течения сыпучего материала вниз по наклонному желобу

и поверхностям насыпей. Наиболее полно и системно явление сегрегации сыпучих материалов представлено в работе [4], где акцентировано внимание на двух важных выводах: сегрегация происходит только при перемещении частиц относительно друг друга и может быть использована для интенсификации процесса смешивания. Именно использование эффекта сегрегации для интенсификации процесса смешивания является наиболее эффективным направлением в дальнейшем совершенствовании способов смешивания и устройств для их реализации.

Кроме того, в работе приведен анализ основных подходов к математическому моделированию процесса сегрегации в сдвиговых гравитационных потоках сыпучих материалов.

При рассмотрении способов управления сегрегацией в технологических процессах переработки сыпучих материалов авторы используют результаты работы [4] и разделяют методы управления сегрегацией на три категории:

- 1) методы, направленные на изменение свойств сыпучего материала в целях снижения склонности последнего к сегрегации;
- 2) методы, направленные на изменение условий взаимодействия частиц и их контакта с внешней средой и элементами конструкций технологического оборудования, то есть условий переработки материалов;
- 3) воздействия, имеющие своей целью восстановление однородности сред, нарушенной под действием сегрегации.

Методы первой группы учитывают свойства частиц, вследствие которых доминирует тот или иной механизм сегрегации. В результате, для снижения склонности материала к сегрегации предлагается целенаправленное изменение свойств частиц, оказывающих доминирующее влияние на сегрегацию. В данном случае одним из путей решения проблемы является уменьшение разницы в размерах частиц компонентов смеси за счет измельчения и классификации. Следует отметить, что данный путь связан не только с увеличением энергоемкости процесса, но и усилением его стохастичности.

В числе методов второй группы указываются изменения регламента технологических операций, их последовательности, объема партий перерабатываемого материала, скорости потока и его геометрии.

Методы третьей группы имеют своей целью восстановление однородности сред, нарушенной под действием сегрегации при выполнении технологических операций переработки сыпучих материалов.

В качестве одного из эффективных способов восстановления однородности сегрегированной зернистой среды указываются технические решения, реализующие идею избирательного извлечения сегрегированных частей и их объединение в потоке с восстановленной однородностью.

По нашему мнению, наиболее перспективные – методы второй группы, в частности, изменение регламента процесса смешивания. Одним из вариантов реализации процесса смешивания является упорядоченная загрузка компонентов [5]. Ускорить процесс смешивания и повысить качество готовой смеси, возможно, за счет организации в рабочем объеме смесителя направленного движения частиц одного или нескольких компонентов в определенные зоны.

Анализ механизмов сегрегации и методов управления данным процессом позволяет сделать вывод о том, что при выборе смесителей для приготовления смесей из компонентов, склонных к сегрегации, особое внимание необходимо уделять возможности организации направленного движения частиц одного или нескольких компонентов в определенные зоны.

Способы смешивания сыпучих материалов и смесители для их реализации

Как отмечалось выше, способы смешивания и конструкции смесителей представлены во многих работах, например [2, 6]. В различных отраслях промышленности широко используются барабанные смесители, что можно объяснить простотой их конструкции, надежности и простоты эксплуатации.

Схема типовой конструкции барабанного смесителя показана на рис. 1. Смеситель содержит цилиндрический барабан 1, камеры для загрузки 2 и выгрузки 3, соединенные с патрубками загрузки 4 и выгрузки 5 компонентов. На барабане установлены бандажи 6, передающие нагрузку от веса барабана, заполненного материалом на ролики опорной 7 и опорно-упорной станций 8 материала, привод, включающий двигатель 9, редуктор 10 и шестерню 11, находящуюся в зацеплении с венцовым колесом 12, которое укреплено на барабане 1.

Режимы движения материала в поперечном сечении барабана (рис. 2) хорошо изучены и классифицированы следующим образом [7]: периодических скольжений относительно обечайки барабана (slipping); периодических обрушений

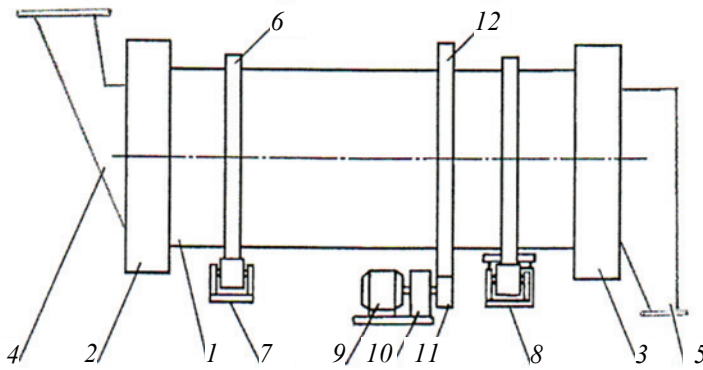
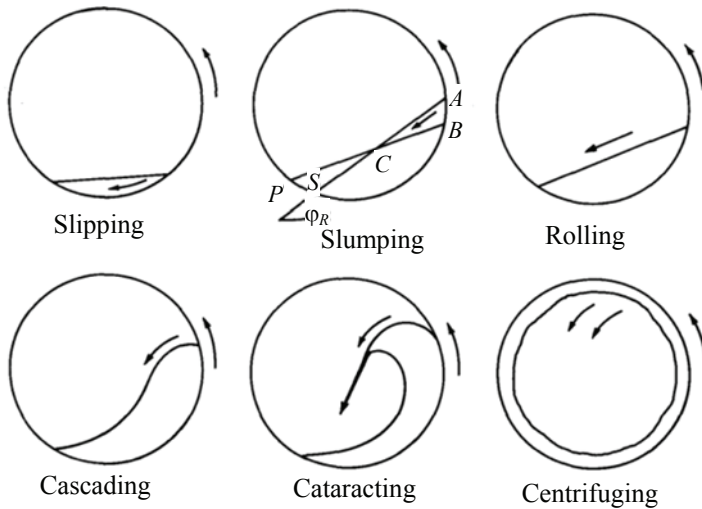


Рис. 1. Схема барабанного смесителя



**Рис. 2. Схемы типовых режимов движения сыпучих материалов
в поперечном сечении гладкого вращающегося барабана**



Рис. 3. Схема распределения мелких и крупных частиц в поперечном сечении гладкого вращающегося барабана

частицы скатываются вниз по криволинейным траекториям. Именно в этом слое происходит смешивание и сегрегация частиц компонентов, поскольку сыпучий материал находится в разрыхленном состоянии. Независимо от регламента загрузки компонентов, в конечном итоге происходит формирование зоны (в окрестностях центра циркуляции сыпучего материала) с повышенной концентрацией, например, мелких частиц (рис. 3).

Аналогичная ситуация складывается при смешивании легких и тяжелых частиц. Данный факт использован для интенсификации процесса смешивания компонентов, склонных к сегрегации. Устройство для реализации такого способа смешения сыпучих материалов [8] представлено на рис. 4. Оно содержит корпус 1,

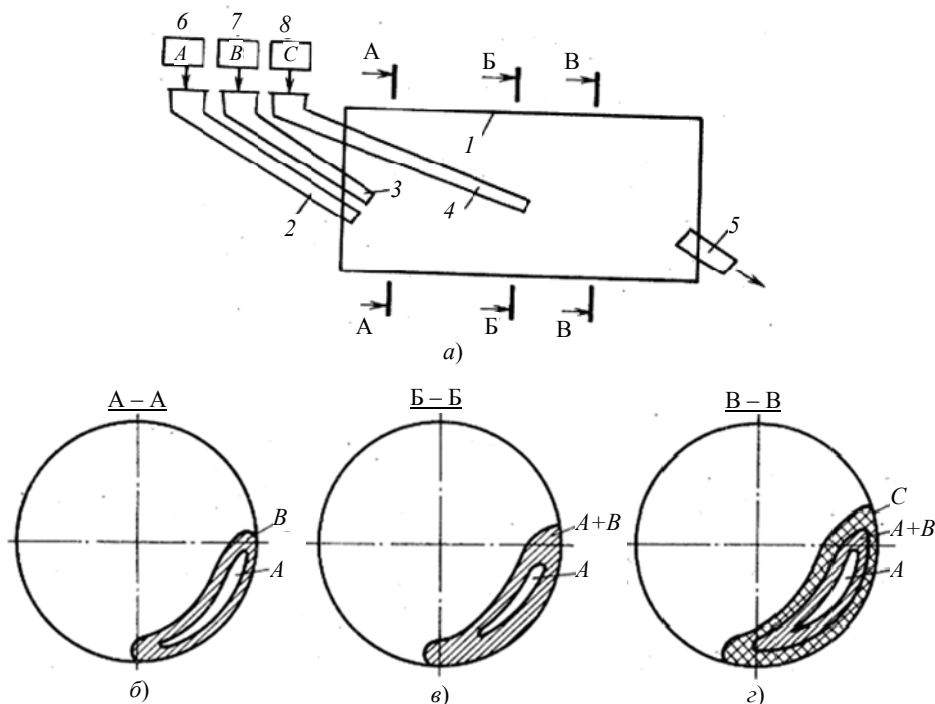


Рис. 4. Схема устройства для упорядоченной загрузки компонентов и распределения компонентов в поперечном сечении гладкого вращающегося барабана

(slumping); перекачивания частиц по открытой поверхности сыпучего материала (rolling); циркуляционный (cascading); водопадный (cataracting); центрифужный или закритический (centrifuging).

При реализации процесса смешивания используется циркуляционный режим. В данном случае, весь материал в поперечном сечении гладкого вращающегося барабана можно условно разделить на слои: поднимающийся и скатывающийся. В поднимающемся слое частицы движутся по концентрическим окружностям с угловой скоростью, равной скорости вращения барабана. В этом слое частицы неподвижны относительно друг друга; процессов смешивания и сегрегации нет. В скатывающемся слое

патрубки загрузки компонентов 2 – 4 и выгрузки готовой смеси 5. Основной компонент *A* поступает в смеситель через патрубок 2, а ключевые компоненты *B* и *C* – из патрубков 3 и 4. Размер частиц уменьшается от компонента *A* к компоненту *C*. В соответствии с механизмами сегрегации, рассмотренными выше, при вращении барабана компоненты *B* и *C* будут целенаправленно перемещаться к центру циркуляции сыпучего материала в поперечном сечении барабана.

На рис. 4, б показано распределения компонентов *A* и *B* непосредственно после загрузки компонента *B*; рис. 4, в – распределение компонентов непосредственно перед загрузкой компонента *C*; рис. 4, г – после загрузки данного компонента. Процесс смешивания необходимо завершить в тот момент, когда частицы компонентов *B* и *C* будут «на полпути» к центру циркуляции. Данный подход к организации процесса смешивания позволяет не только повысить качество смеси, но и сократить время процесса.

Совершенствование способа смешивания компонентов, склонных к сегрегации, реализовано за счет загрузки компонентов в порядке увеличения плотностей и(или) уменьшения размера частиц в работающий смеситель, при этом время загрузки отдельных компонентов пропорционально объему материала, находящегося в смесителе к моменту загрузки данного компонента, а время между загрузками отдельных компонентов, начиная со второго, пропорционально объему материала, находящегося в смесителе, плотностям и размерам загружаемых частиц [9].

Аналогично происходит процесс смешивания в барабанном вибрационном смесителе [10]. Смеситель состоит из барабана, ось которого находится в подшипниковых опорах, установленных на основании, совершающем колебания. Под действием вибрации барабан начинает вращаться. Материал в поперечном сечении барабана в зависимости от направления, амплитуды и частоты колебаний образует один или два циркуляционных контура.

Вибрация используется в устройстве для приготовления смесей, схема которого показана на рис. 5 [11].

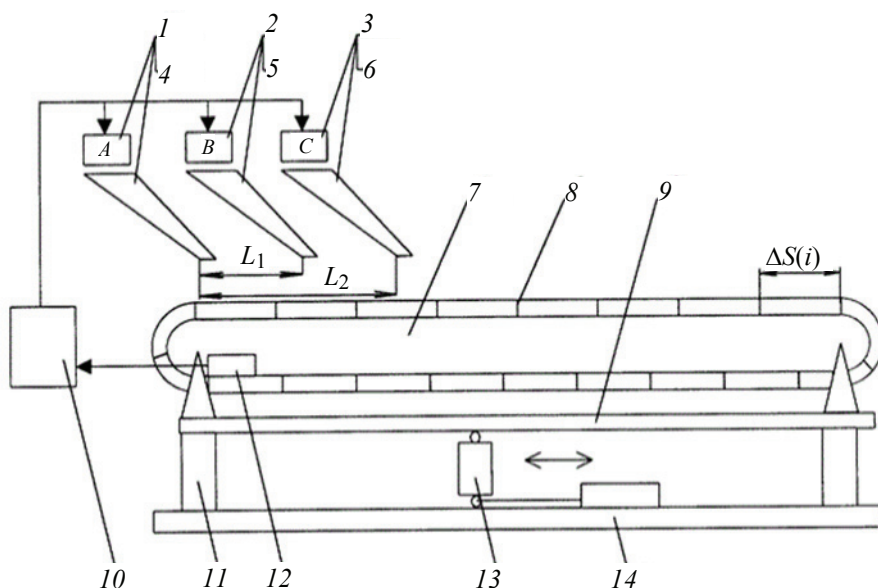


Рис. 5. Схема устройства для приготовления многокомпонентных смесей

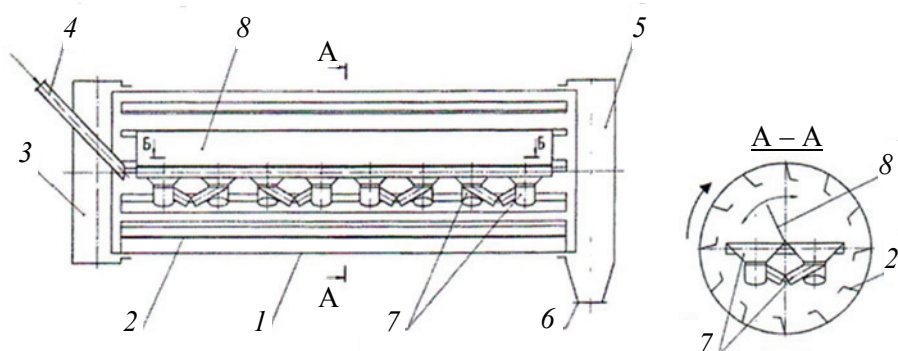


Рис. 6. Схема устройства с направленным движением потоков

Устройство содержит порционные дозаторы $1 - 3$ соответственно для компонентов A, B, C смеси, вибролотки $4 - 6$ для преобразования порции в непрерывный поток, расположенные вдоль ленточного транспортера 7 через определенные расстояния, имеющего поперечные перегородки 8 с возможностью фиксированного перемещения. Ленточный транспортер 7 находится на виброплите 9 , установленной через амортизаторы 11 на основание 14 . Вибратор 13 шарнирно закреплен с виброплитой и основанием с возможностью фиксированного перемещения в горизонтальной плоскости. На ленточном транспортере установлен датчик фиксации положения 12 перегородки 8 , который подает управляющий сигнал на блок управления 10 порционными дозаторами. В данном устройстве реализована упорядоченная загрузка компонентов, поскольку, согласно предлагаемому способу, размеры частиц уменьшаются от компонента A к компоненту C и(или) плотности материалов частиц наоборот возрастают. Численные значения L_1 и L_2 определяются в зависимости от размеров, плотностей и концентраций частиц компонентов.

Направленное движение компонентов может быть организовано посредством ряда патрубков, установленных вдоль оси барабана смесителя [12]. Схема устройство для реализации такого способа смешивания показана на рис. 6. Устройство содержит вращающийся барабан 1 с периферийной Г-образной насадкой 2 , загрузочную камеру 3 с патрубком 4 ввода компонентов смеси, разгрузочную камеру 5 с патрубком 6 вывода смеси.

В барабане неподвижно установлены горизонтальными продольными рядами отклоняющие элементы, выполненные в виде воронок 7 с течками, имеющими наклон в сторону загрузочного торца барабана. На одной из продольных кромок воронок каждого ряда элементов закреплены поворотные пластины 8 , для регулирования величины потоков частиц, попадающих на отклоняющие элементы. Отклоняющие элементы 7 объединены в группы, расположенные вдоль барабана. Каждая группа содержит по четыре элемента, два из которых размещены в подъемной и два – в опускной частях барабана. При этом течка каждого элемента направлена в сторону одного из смежных с ним элементов группы таким образом, что в совокупности течки элементов группы образуют замкнутый контур в проекции на горизонтальную плоскость. Течки элементов в смежных группах образуют контуры с противоположным направлением течек. За счет объединения встречных потоков, преимущественно содержащих частицы разных размеров, интенсифицируется процесс смешивания и снижается эффект сегрегации.

Как отмечалось выше, сегрегация происходит при перемещении частиц относительно друг друга, поэтому минимизация движения частиц компонентов в готовой смеси является одним из путей снижения негативного воздействия

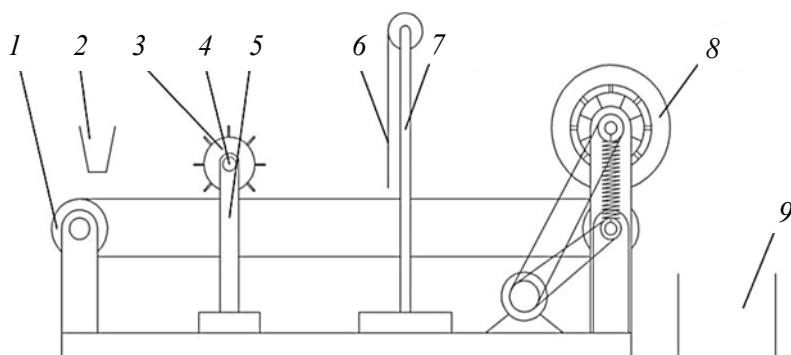


Рис. 7. Схема агрегата:

1 – транспортная лента; 2 – дозаторы; 3 – разбрасыватель; 4 – привод разбрасывателя; 5 – поворотная стойка; 6 – отбойный элемент; 7 – кронштейн для отбойного элемента; 8 – уплотняющий валик; 9 – зоны выгрузки

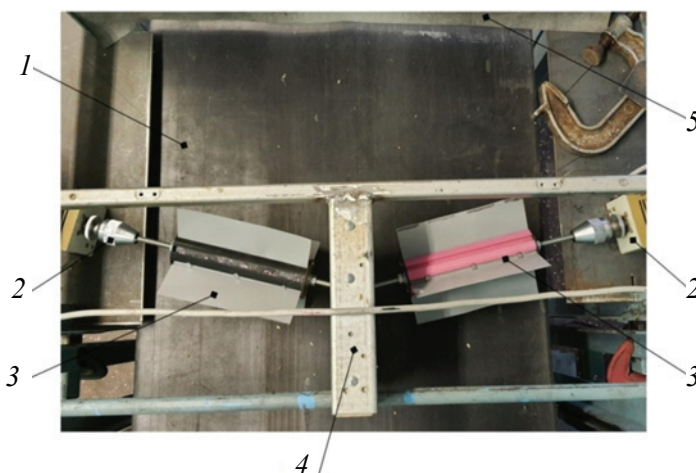


Рис. 8. Расположение разбрасывающих устройств и отбойника над лентой:

1 – транспортер; 2 – привод; 3 – разбрасыватели; 4 – поворотное приспособление; 5 – рамка с эластичный материал (отбойник)

эффекта сегрегации на качество смеси. Данный прием реализован в ряде смесителей [13, 14]. Схема одного из таких агрегатов для смешивания и уплотнения сыпучих материалов показана на рис. 7 [15].

Для лучшего понимания особенностей данного агрегата рассмотрим расположение разбрасывающих устройств и отбойника над лентой рис. 8 [15].

Данный агрегат предназначен для приготовления двухкомпонентных смесей, но при незначительных дополнениях может быть использован для приготовления многокомпонентных смесей. Основная идея заключается в том, что компоненты подаются на ленту двумя разными потоками, попадая в зоны разбрасывателей, формируются разреженные потоки компонентов, которые пересекаются, в результате чего происходит взаимное проникновение частиц и распределение с образованием смеси. Схема взаимодействия дисперсных потоков изображена на рис. 9. После смешивания частицы компонентов ударяются в упругий экран и падают на ленту. На ленте частицы смеси не перемещаются относительно друг друга, следовательно, сегрегация не происходит.

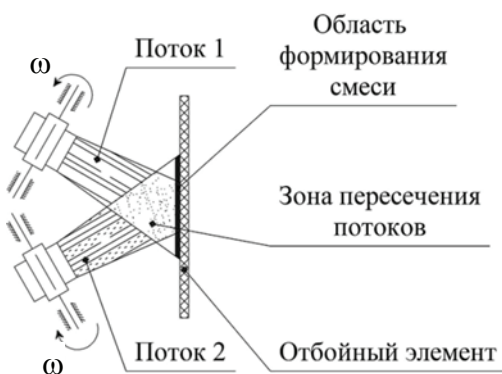


Рис. 9. Схема взаимодействия дисперсных потоков

Процесс детерминированного формирования смеси осуществляется циклически. На каждом цикле загружаются три компонента в разные зоны смесительной емкости, за счет расположения неподвижных питателей. После загрузки компонентов смесительная емкость (тара) поворачивается на угол φ равный $\varphi = i\pi + \Delta\varphi$, где i – номер цикла. Цикл загрузки повторяется.

Таким образом, формируется равномерная смесь. Следует отметить, что чем меньше толщина слоя, тем лучше качество смеси. Очевидно, что качество смеси очень сильно зависит от точности дозирования компонентов. Аналогичным образом организовано детерминированное формирование смеси на конвейерном нонмиксере, схема которого показана на рис. 11 [21].

Особый интерес представляет технология «нонмиксинга» [16 – 24], в которой реализована упорядоченная загрузка компонентов. Особенности данной технологии заключаются в том, что компоненты в необходимой пропорции малыми порциями загружаются в рабочий объем смесителя, изначально формируя равномерное их распределение в готовой смеси. Указанные особенности рассмотрим на примере загрузки компонентов в бироторный смеситель (рис. 10) [21].

В рассматриваемом случае в смеситель загружаются три компонента в пропорции $Q_1 : Q_2 : Q_3$.

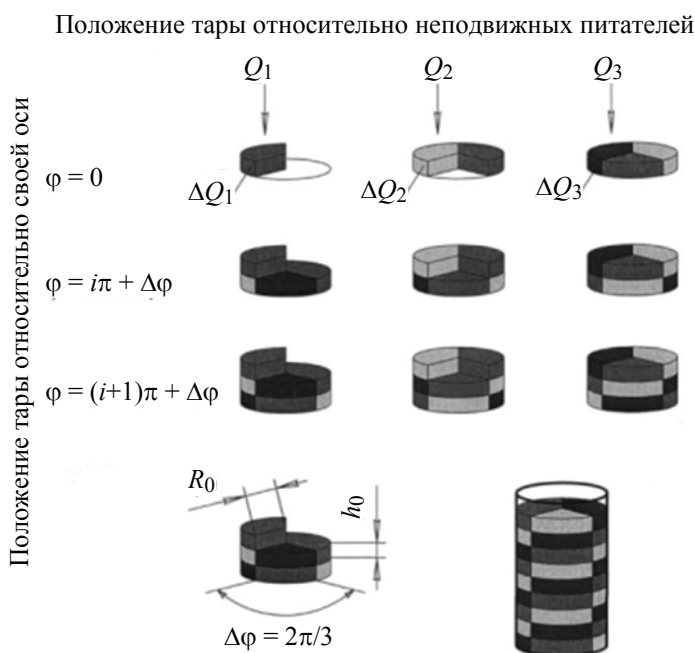


Рис. 10. Схема загрузки компонентов в бироторный смеситель

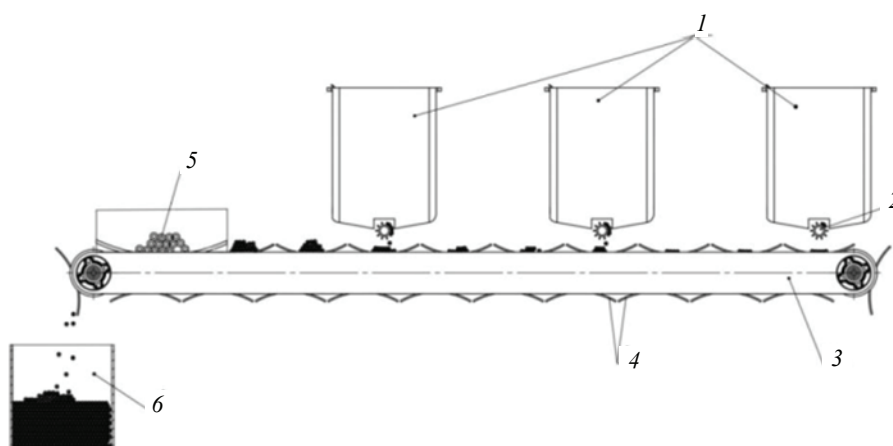


Рис. 11. Схема конвейерного немиксера:

1 – бункеры компонентов; 2 – барабанные дозаторы; 3 – конвейер;
4 – желоба для формирования единичных доз смеси; 5 – единичная доза смеси;
6 – емкость готовой смеси

В данном случае, три бункера 1 с компонентами смеси расположены вдоль ленты, и на каждом бункере установлен барабанный дозатор 2. На ленте конвейера 3 имеются желоба 4 для формирования единичных доз смеси. В конечном итоге смесь попадает в емкость 6.

Вопросы математического моделирования и рекомендации по проектированию немиксеров рассмотрены в работах [25, 26].

Заключение

Анализ способов непрерывного дозирования, которые в настоящее время используются в промышленности, показал, что основной причиной, препятствующей повышению точности дозирования, являются динамические воздействия на датчик веса, поскольку вес материала определяется во время его движения. Показано, что двухстадийная технология весового непрерывного дозирования является наиболее перспективной для повышения точности дозирования. Эта технология не только позволяет существенно снизить динамические воздействия на датчик веса, но и при изменении последовательности основных операций (формирование отдельных порций, определение веса этих порций, расчет промежутков времени между подачей порций и преобразование их в непрерывный поток) позволит полностью исключить данные воздействия. Намечены пути совершенствования двухстадийной технологии дозирования и устройств для ее реализации, которые повысят точность дозирования и увеличат диапазоны производительности дозаторов. Сделан вывод, так как точность дозирования влияет на качество готовой смеси, необходимо рассматривать процессы дозирования компонентов и их смешивание совместно с учетом взаимосвязи этих процессов. Показано, что при приготовлении смесей из компонентов, склонных к сегрегации, целесообразно максимально детерминировать процесс смешивания и проводить упорядоченную загрузку компонентов с учетом их физико-механических свойств.

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. Макаров, Ю. И. Аппараты для смешения сыпучих материалов / Ю. И. Макаров. – М. : Машиностроение, 1973. – 216 с.
3. Brown, R. L. The Fundamental Principles of Segregation / R. L. Brown // J. Inst. Fuel. – 1939. – Vol. 13. – P. 15 – 19.
4. Bates, L. User Guide to Segregation / L. Bates. – British Materials Handling Board, Elsinore house, United Kingdom, 1997. – 134 p.
5. Пат. 2478420 Российская Федерация, МПК В01F13/18. Способ непрерывного приготовления многокомпонентных смесей и устройство для его реализации / Ю. Т. Селиванов, В. Ф. Першин, А. С. Дурнев ; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет». – № 2011131090/05 ; заявл. 25.07.2011 ; опубл. 10.04.13, Бюл. № 2.
6. Конструирование и расчет машин химических производств / Ю. И. Гусев, И. Н. Карасев, Э. Э. Кольман-Иванов [и др.] ; под ред. Э. Э. Кольмана-Иванова. – М. : Машиностроение, 1985. – 408 с.
7. Henein, H. The Modeling of Transverse Solids Motion in Rotary Kils / H. Henein, J. K. Brimacobe and A. P. Watkinson // Metallurgical Transactions B. – 1983. – Vol. 14B(2). – P. 207 – 220.
8. А. с. 129789554 СССР, МКИ В 01F 3/18. Способ приготовления многокомпонентных смесей сыпучих материалов / В. Ф. Першин ; заявитель и патентообладатель Тамбовский институт химического машиностроения. – № 3861237 ; заявл. 02.01.1985 ; опубл. 23.03.1987, Бюл. № 11.
9. А. с. 1326323 СССР, МКИ В 01F 3/18. Способ приготовления смеси сыпучих материалов / В. Ф. Першин ; заявитель и патентообладатель Тамбовский институт химического машиностроения. – № 3834337 ; заявл. 02.01.1985 ; опубл. 30.07.1987, Бюл. № 28.
10. Пат. 2162365 Российская Федерация, МКИ В01 F11/00. Барабанный смеситель / А. А. Пасько, В. Ф. Першин, В. П. Таров, А. А. Коптев, В. Л. Негров ; заявитель и патентообладатель Тамбовский государственный технический университет. – № 99110526/12 ; заявл. 18.05.1999, опубл. 27.01.2001, Бюл. № 3.
11. Пат. 2242273 Российская Федерация, МКИ В01F 3/18. Способ приготовления многокомпонентной смеси и устройство для его реализации / В. Ф. Першин, С. В. Барышникова, Д. К. Каляпин, А. А. Осипов ; заявитель и патентообладатель Тамбовский государственный технический университет. – № 2003113033/15 ; заявл. 05.05.2003 ; опубл. 20.12.2004, Бюл. № 35.
12. Пат. 2487748 Российская Федерация, МПК В01F9/06. Способ смешения материалов и устройство для его осуществления / В. Н. Долгунин, О. О. Иванов, А. Н. Куди, Е. А. Рябова, Е. П. Ларионова ; заявитель и патентообладатель Тамбовский государственный технический университет (RU). – №2011154410/05 ; заявл. 29.12.2011 ; опубл. 20.07.2013, Бюл. № 32.
13. Пат. 2624698 Российская Федерация, МПК В01F3/18. Агрегат для смешения и уплотнения сыпучих материалов / А. Е. Лебедев, А. А. Ватагин, М. Е. Борисовский, М. Н. Романова, Н. В. Бадаева, И. С. Шеронина ; заявитель и патентообладатель ООО «МилИнвест». – № 2016143292 ; заявл. 02.11.2016 ; опубл. 05.07.2017. Бюл. № 19.
14. Лебедев, А. Е. Аппараты для переработки дисперсных сред. Теория и расчет : монография / А. Е. Лебедев, А. И. Зайцев, А. Б. Капранова, А. А. Ватагин, С. Суид. – Ярославль : Издат. дом ЯГТУ, 2018. – 132 с.
15. Ватагин, А. А. Совершенствование процессов смешивания сыпучих материалов, склонных к сегрегации, в аппаратах с подвижной лентой : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 2.6.13 / Ватагин Александр Александрович. – Иваново, 2022. – 16 с.
16. Пат. 2129911 Российская Федерация, МПК В01F 3/18 (1995.01). Способ смешения сыпучих компонентов и устройство для его реализации / А. Н. Лукаш, И. А. Клусов, А. С. Овчинников, А. В. Евсеев ; заявитель и патентообладатель

Тулский государственный университет. – № 98107352/25; заявл. 21.04.1998 ; опубл. 10.05.99, Бюл. № 13.

17. Пат. 2271243 Российская Федерация, МПК В01F 3/18 (2006.01). Способ смешения сыпучих компонентов и устройство для его реализации / А. Н. Лукаш, А. В. Евсеев, Т. А. Овчинникова, К. В. Власов, О. В. Карпухина ; патентообладатель Тульский государственный университет. – № 2004131116/15 ; заявл. 25.10.2004; опубл. 10.03.06, Бюл. №7.

18. Пат. 2707998 Российская Федерация, МПК В01F 3/18 (2006.01); В01F 9/10 (2006.01); В01F 15/02 (2006.01); В01F 15/04 (2006.01). Способ получения смеси из сыпучих компонентов и устройство для его осуществления / А. В. Евсеев ; патентообладатель А. В. Евсеев. – № 2019104861 ; заявл. 21.02.2019 ; опубл. 03.12.19. Бюл. №34.

19. Пат. 2708780 Российская Федерация, МПК В65G 53/46 (2006.01); В65G 53/48 (2006.01). Роторный питатель для сыпучего материала / А. В. Евсеев ; патентообладатель А. В. Евсеев. – № 2019104089 ; заявл. 14.02.2019 ; опубл. 11.12.19, Бюл. № 35.

20. Пат. 2749267 Российская Федерация, МПК В01F 3/18 (2006.01). Способ для получения смеси из трубчатых компонентов и устройство для его реализации / А. В. Евсеев ; патентообладатель ФГБОУ ВО «Тулский государственный университет». – № 2020118425 ; заявл. 25.05.2020 ; опубл. 07.06.21, Бюл. № 16.

21. Евсеев, А. В. Теория и оборудование детерминированного формирования однородности гетерогенных смесей : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.13 / Евсеев Алексей Владимирович. – Иваново, 2021. – 32 с.

22. Евсеев, А. В. Нонмиксинг / А. В. Евсеев // Известия Тульского государственного ун-та. Техн. науки. – 2019. – Вып. 9. – С. 27 – 36.

23. Васин, С. А. Некоторые аспекты создания новых конструкций конвейерных и роторных нонмиксеров / С. А. Васин, А. В. Евсеев // Вестник РГУПС. – 2021. – № 2. – С. 32 – 43. doi: 10.46973/0201–727X_2021_2_32

24. Евсеев, А. В. Нонмиксеры – новый класс технологических машин для детерминированного формирования однородности гетерогенных смесей / А. В. Евсеев // Вестник РГУПС. – 2021. – № 2. – С. 44 – 51. doi: 10.46973/0201–727X_2021_2_44

25. Евсеев, А. В. Проверка адекватности математических моделей механизма загрузки сыпучего материала шлюзовым дозатором и их анализ / А. В. Евсеев, О. В. Соколова, М. С. Парамонова // Известия Тульского государственного ун-та. Техн. науки. – 2019. – Вып. 10. – С. 490 – 497.

26. Васин, С. А. Проектирование конвейерных нонмиксеров / С. А. Васин, А. В. Евсеев // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2021. – № 8. – С. 379 – 384. doi: 10.36652/0202-3350-2021-22-8-379-384

Apparatus for Preparing a Mixture from Components Prone to Segregation: Current Status and Prospects. Part II

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. Makarov Yu.I. *Apparaty dlya smesheniya sypuchikh materialov* [Apparatus for mixing bulk materials], Moscow: Mashinostroyeniye, 1973, 216 p. (In Russ.)
3. Brown R.L. The Fundamental Principles of Segregation, *J. Inst. Fuel*, 1939, vol. 13, pp. 15-19.
4. Bates L. *User Guide to Segregation*. British Materials Handling Board, Elsinore house, United Kingdom, 1997. 134 p.
5. Selivanov Yu.T., Pershin V.F., Durnev A.S. *Sposob nepreryvnogo prigotovleniya mnogokomponentnykh smesey i ustroystvo dlya yego realizatsii* [A method for continuous preparation of multicomponent mixtures and a device for its implementation], Russian Federation, 2013, Pat. 2478420. (In Russ.)
6. Gusev Yu.I., Karasev I.N., Kol'man-Ivanov E.E. (Ed.), Makarov Yu.N., Maksanin M.P., Rasskazov N.I. *Konstruirovaniye i raschet mashin khimicheskikh proizvodstv* [Design and calculation of machines for chemical production], Moscow: Mashinostroyeniye, 1985, 408 p. (In Russ.)
7. Henein H.J., Brimacobe K., Watkinson A.P. The Modeling of Transverse Solids Motion in Rotary Kils, *Metallurgical Transactions B.*, 1983, vol. 14B(2), pp. 207-220.
8. Pershin V.F. *Sposob prigotovleniya mnogokomponentnykh smesey sypuchikh materialov* [The method of preparation of multicomponent mixtures of bulk materials], Russian Federation, 1987, A. s. 129789554 (In Russ.)
9. Pershin V.F. *Sposob prigotovleniya smesi sypuchikh materialov* [Method for preparing a mixture of bulk materials], Russian Federation, 1987, A. s. 1326323 (In Russ.)
10. Pas'ko A.A., Pershin V.F., Tarov V.P., Koptev A.A., Negrov V.L. *Barabannyi smesitel'* [Drum mixer], Russian Federation, 2001, Pat. 2162365 (In Russ.)
11. Pershin V.F., Baryshnikova S.V., Kalyapin D.K., Osipov A.A. *Sposob prigotovleniya mnogokomponentnoy smesi i ustroystvo dlya yego realizatsii* [A method for preparing a multicomponent mixture and a device for its implementation], Russian Federation, 2004, Pat. 2242273 (In Russ.)
12. Dolgunin V.N., Ivanov O.O., Kudi A.N., Ryabova Ye.A., Larionova Ye.P. *Sposob smesheniya materialov i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya* [A method of mixing materials and a device for its implementation], Russian Federation, 2013, Pat. 2487748 (In Russ.)

13. Lebedev A.Ye., Vatagin A.A., Borisovskiy M.Ye., Romanova M.N., Badayeva N.V., Sheronina I.S. *Agregat dlya smesheniya i uplotneniya sypuchikh materialov* [Unit for mixing and compacting bulk materials], Russian Federation, 2017, Pat. 2624698 (In Russ.).
14. Lebedev A.Ye., Zaytsev A.I., Kapranova A.B., Vatagin A.A., Suid S. *Apparaty dlya pererabotki dispersnykh sred. Teoriya i raschet: monografiya* [Apparatus for processing dispersed media. Theory and calculation: monograph], Yaroslavl': Izdatel'skiy dom YAGTU, 2018, 132 p. (In Russ.).
15. Vatagin A.A. *Extended abstract of Candidate's of Engineering thesis*, Ivanovo, 2022, 16 p. (In Russ.).
16. Lukash A.N., Klusov I.A., Ovchinnikov A.S., Yevseyev A.V. *Sposob smesheniya sypuchikh komponentov i ustroystvo dlya yego realizatsii* [A method of mixing loose components and a device for its implementation], Russian Federation, 1999, Pat. 2129911 (In Russ.).
17. Lukash A.N., Yevseyev A.V., Ovchinnikova T.A., Vlasov K.V., Karpukhina O.V. *Sposob smesheniya sypuchikh komponentov i ustroystvo dlya yego realizatsii* [A method of mixing loose components and a device for its implementation], Russian Federation, 2006, Pat. 2271243. (In Russ.).
18. Yevseyev A.V. *Sposob polucheniya smesi iz sypuchikh komponentov i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya* [Method for obtaining a mixture of bulk components and a device for its implementation], Russian Federation, 2019, Pat. 2707998. (In Russ.).
19. Yevseyev A.V. *Rotornyy pitatel' dlya sypuchego materiala* [Rotary feeder for bulk material], Russian Federation, 2019, Pat. 2708780 (In Russ.).
20. Yevseyev A.V. *Sposob dlya polucheniya smesi iz trubchatykh komponentov i ustroystvo dlya yego realizatsii* [Method for producing a mixture of tubular components and a device for its implementation], Russian Federation, 2020, Pat. 2749267 (In Russ.).
21. Yevseyev A.V. *Extended abstract of Doctor's of Engineering thesis*, Ivanovo, 2021, 32 p. (In Russ.).
22. Yevseyev A.V. [Nonmixing], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universitetata. Tekhnicheskiye nauki* [Proceedings of the Tula State University. Technical science], 2019, Is. 9, pp. 27-36. (In Russ., abstract in Eng.)
23. Vasin S.A., Yevseyev A.V. [Some aspects of creating new designs of conveyor and rotary non-mixers], *Vestnik RGUPS* [Bulletin of the RGUPS], 2021, no. 2, pp. 32-43. doi: 10.46973/0201-727X_2021_2_32 (In Russ., abstract in Eng.)
24. Yevseyev A.V. [Nonmixers – a new class of technological machines for deterministic formation of homogeneity of heterogeneous mixtures], *Vestnik RGUPS* [Bulletin of the RGUPS], 2021, no. 2, pp. 44-51. doi: 10.46973/0201-727X_2021_2_44 (In Russ., abstract in Eng.)
25. Yevseyev A.V., Sokolova O.V., Paramonova M.S. [Verification of the adequacy of mathematical models of the mechanism for loading bulk material with a sluice dispenser and their analysis], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universitetata. Tekhnicheskiye nauki* [Izvestiya Tula State University. Technical science], 2019, Is. 10, pp. 490-497. (In Russ., abstract in Eng.)
26. Vasin S.A., Yevseyev A.V. [Design of conveyor non-mixers], *Sborka v mashinostroyenii, priborostroyenii* [Assembly in mechanical engineering, instrument making], 2021, no. 8, pp. 379-384. doi: 10.36652/0202-3350-2021-22-8-379-384 (In Russ., abstract in Eng.)

Aggregate zur Herstellung der Mischung aus den zur Segregation neigenden Komponenten. Moderner Zustand und Perspektiven. Teil II

Zusammenfassung: Es sind die wichtigsten Dosierungs- und Mischmethoden betrachtet, sowie Vorrichtungen zur Durchführung dieser Verfahren. Am Beispiel von Bandspendern und Spendern mit Loss-In-Weight-Technologie ist gezeigt, dass die dynamische Einwirkung auf den Gewichtssensor der Hauptgrund für die Verhinderung einer höheren Dosierungsgenauigkeit ist, da das Gewicht des Materials während der Bewegung bestimmt wird. Es ist die Analyse der zweistufigen Technologie der gewichtskontinuierlichen Dosierung durchgeführt und die Schlussfolgerung über die Aussichten dieser Technologie im Hinblick auf die Erhöhung der Dosiergenauigkeit gezogen. Verbesserungsmöglichkeiten der zweistufigen Dosiertechnik und Geräte zu ihrer Umsetzung sind skizziert. Da sich die Dosiergenauigkeit auf die Qualität der fertigen Mischung auswirkt, ist festgestellt, dass es notwendig ist, die Prozesse der Dosierung der Komponenten und ihres Zusammenmischens unter Berücksichtigung der Beziehung dieser Prozesse zu analysieren.

Unités de mélange à partir des composants susceptibles à la ségrégation: état actuel et perspectives. Deuxième partie

Résumé: Sont examinées les principales méthodes de dosage et de mélange ainsi que des dispositifs pour mettre en œuvre ces méthodes. À l'exemple des doseurs à bande et des doseurs utilisant la technologie Loss-in-Weight est montré que la principale raison qui empêche l'amélioration de la précision du dosage est l'influence dynamique sur le capteur de poids, car le poids du matériau est déterminé pendant son mouvement. Est réalisée une analyse de la technologie en deux étapes du dosage de poids continu; est fait la conclusion que cette technologie est prometteuse. Sont présentées les voies de l'amélioration de la précision de dosage. Les moyens d'améliorer la technologie de dosage en deux étapes et les dispositifs de mise en œuvre sont envisagés. Est établi que puisque la précision du dosage influence sur la qualité du mélange, il est nécessaire d'examiner les processus de dosage et de mélange des composants en tenant compte de la relation entre ces processus.

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.

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА РЕЗЬБОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРАСПЕДИКУЛЯРНЫХ ВИНТОВ

А. С. Пятых¹, С. А. Тимофеев², В. А. Ушаков¹

*Кафедра «Технология и оборудование машиностроительных производств» (1),
ruatykhas@ex.istu.edu, НИЛ «Технологии высокопроизводительной механической
обработки» (2), ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский
университет», Иркутск, Россия*

Ключевые слова: режимы резания; резьба; титановые сплавы; точение; транспедикулярный винт; шероховатость поверхности винта.

Аннотация: Изучено влияние параметров механической обработки на качество резьбовой поверхности транспедикулярных винтов. В качестве материала заготовки использованы титановый сплав ВТ6, головка для вихревого резбонарезания со сменными твердосплавными пластинами. Обработка выполнена на токарном станке продольного точения. В процессе изготовления транспедикулярных винтов дана оценка влияния угла наклона резбонарезной головки на шероховатость поверхности винта. Контроль шероховатости осуществлен с помощью оптического профилометра. В качестве контролируемого параметра рассмотрен параметр шероховатости *Ra*. Изучена микроструктура транспедикулярных винтов на световом металлографическом микроскопе в светлом поле при увеличении от 100 до 1000 раз. В результате экспериментов определен рациональный угол наклона резбонарезной головки с точки зрения влияния на шероховатость поверхности транспедикулярного винта.

Введение

Распространенность заболеваний и нарушений позвоночника значительно возросла, и ожидается, что данная тенденция сохранится и в ближайшие десять лет. В связи с этим возрастают и количественные объемы применяемых спинальных устройств для лечения остеохондроза, сложных деформаций, а также лечения травм и переломов. Спинальные устройства по мере их применения становятся все более актуальными. Проблема поломки транспедикулярных винтов, существующая в РФ, приводит к дополнительной травматизации (вплоть до риска летального исхода), ухудшению качества жизни и снижению трудоспособности пациентов, которым они были установлены, а также вызывает увеличение нагрузки на системы здравоохранения и социального обеспечения [1]. Актуальной становится задача обеспечения качества изготовления спинальных устройств, в том числе и транспедикулярных имплантов для проведения минимально инвазивных процедур, исключающих впоследствии риски реимплантации.

Поломки транспедикулярных винтов наблюдаются в месте перехода от головки винта к резьбовой части и(или) в месте третьего-четвертого резьбового витка. Данные участки – наиболее нагруженные, поэтому дефекты поверхности винта могут являться концентраторами и играть роль очагов возникновения суб-

микроскопических нарушений сплошности металла поверхностного слоя, становясь первопричиной образования усталостных трещин. Концентрация напряжений, возникающая во впадинах микронеровностей, зависит от высоты, радиуса закругления впадин и шага микронеровностей [2]. В связи с этим становится актуальной задача минимизации концентраторов напряжений за счет обеспечения минимальной шероховатости поверхностей винта [3].

В научной литературе вопросы обеспечения качества транспедикулярных винтов за счет выбора оптимальной технологии изготовления и назначения обоснованных режимов резания рассматриваются в ограниченном количестве публикаций. В большинстве работ авторы уделяют внимание формированию поверхности за счет химического травления или пескоструйной обработки [4, 5]. При этом прочностные характеристики винтов зависят от качества поверхности, получаемой после нарезания резьбы. Следовательно, перед суперфинишной операцией, которой является пескоструйная обработка, требуется обеспечить шероховатость наружных поверхностей винта Ra не более 0,63 мкм.

Существуют лезвийная и аддитивная технологии изготовления транспедикулярных винтов. К лезвийной технологии относится так называемое одноточечное резбонарезание, когда резьба формируется с помощью классического резбового резца со сменной пластиной, и многоточечное, когда формирование резьбы осуществляется вихревой головкой с несколькими сменными пластинами, в результате чего повышается производительность и точность изготовления. Данная технология позволяет избежать разупрочнения поверхности, характерного для титановых сплавов [6 – 8], вследствие воздействия высоких температур и обеспечивает лучшее напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя. Винты, изготавливаемые по аддитивной технологии, не соответствуют предъявляемым прочностным характеристикам. Они показали меньшее сопротивление испытаниям на вырыв, чем винты, изготовленные механической обработкой. Однако такие винты за счет менее острой геометрии резьбы обеспечивают лучшее распределение нагрузок и уменьшают эффект надреза [9].

Таким образом, наиболее эффективной технологией изготовления резьбовой части транспедикулярных винтов является вихревое резбонарезание.

Материалы и методы

Для изготовления транспедикулярного винта использована заготовка, которая представляет собой пруток $\varnothing 12$ мм из титанового сплава ВТ6 в состоянии поставки. Химический состав данного сплава, %: Fe – 0...0,3; С – 0...0,1; Si – 0...0,1; V – 3,5...5,3; N – 0...0,05; Ti – 86,45...90,9; Al – 5,3...6,8; Zr – 0...0,3; O – 0...0,2; H – 0...0,015. Механические свойства титанового сплава ВТ6: относительное сужение образца $\psi = 20 - 45$ %; относительное удлинение после разрыва $\delta_5 = 8 - 20$ %; предел прочности при растяжении $\sigma_B = 900...1100$ МПа; твердость $HB \cdot 10^{-1} = 293...361$ МПа.

Экспериментальное изготовление транспедикулярных винтов выполнялось на токарном автомате продольного точения Cincom K16E-VII (рис. 1). Обработка резьбовой части винта выполнялась головкой для вихревого резбонарезания UTILIS MWT12 164 4057 105 09 QC с пластинами MWI12 164 HB6.5 VPUNM10TX+. Изображение головки представлено на рис. 2. Режимы резания определены на основании рекомендаций производителя инструмента. Угол резбобфрезерования подбирался опытным путем (табл. 1). Установка угла фрезерования резьбы осуществлялась с помощью цифрового инклинометра (рис. 3).

В результате изготовлено четыре транспедикулярных винта согласно режимам, указанным в табл. 1. Качество поверхности винтов контролировалось с помощью оптического профилометра Bruker Contour GT-K1 (рис. 4), результаты 3D-сканирования представлены на рис. 5 и в табл. 2. Требование шероховатости наружных поверхностей винтов Ra не более 2,5 мкм по ГОСТ 2789–73 [10], ГОСТ Р 50582–93 [11].

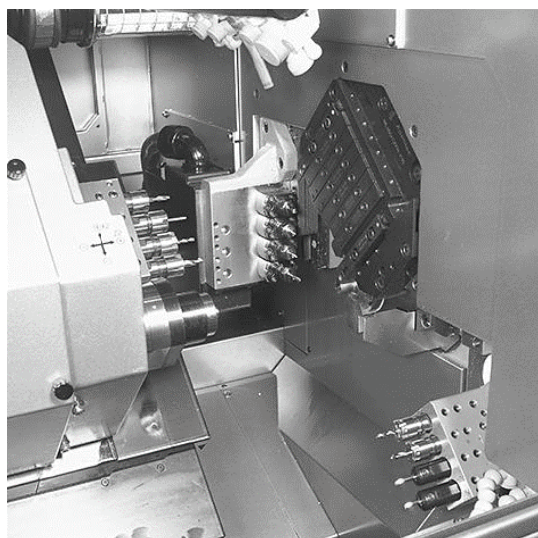


Рис. 1. Рабочая зона станка продольного точения Sincom K16E-VII



Рис. 2. Головка для вихревого нарезания резьбы

Таблица 1

Базовые режимы резания для резьбонарезной головы

Скорость резания V_c , м/мин	Подача f_z , мм/зуб	Глубина резания a_p , мм	Угол фрезерования δ , °
120	0,02	2,25	5,5
			10,0
			10,6
			12,15

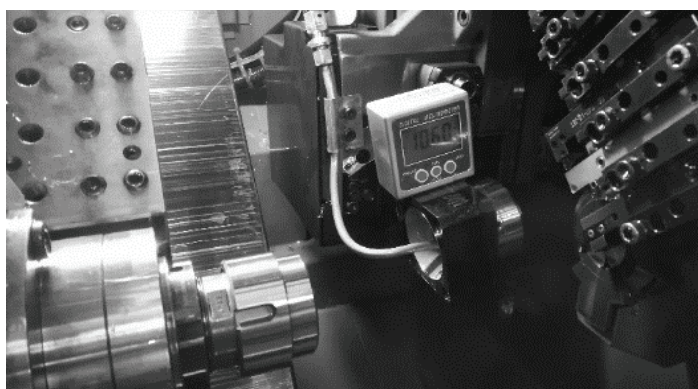


Рис. 3. Установка угла фрезерования

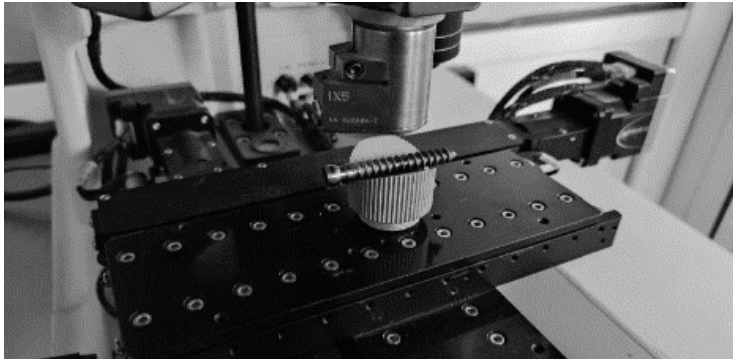


Рис. 4. Измерение шероховатости поверхности транспердикулярного винта на оптическом профилометре Bruker Contour GT-K1

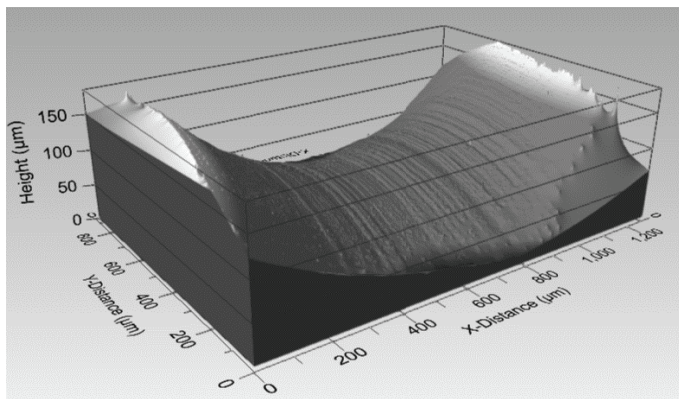


Рис. 5. Поверхность образца винта, полученная в результате сканирования на оптическом профилометре Bruker Contour GT-K1

Таблица 2

Результаты измерения шероховатости

Скорость резания V_c , м/мин	Подача f_z , мм/зуб	Глубина резания a_p , мм	Угол фрезерования δ , °	Ra , мкм
120	0,02	2,25	5,5	0,5686
			10,0	0,5541
			10,6	0,4109
			12,15	0,4994

Результаты и обсуждение

Анализ полученных результатов показывает, что шероховатость резьбовой поверхности винта зависит от угла резьбофрезерования. Наименьшее значение параметра шероховатости Ra достигается при резьбофрезеровании с установленным инструментом под углом $10,6^\circ$.

Далее опытные образцы винтов были разрезаны на части в целях последующего изготовления образцов для микроанализа (рис. 6). После чего исследована микроструктура материала опытных образцов винта на световом микроскопе металлографическом МЕТ-3 в светлом поле при увеличении от 100 до 1000 раз.

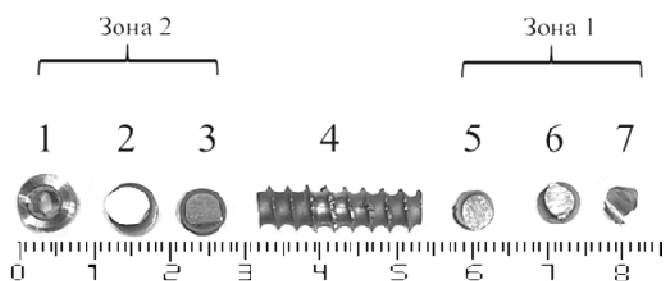


Рис. 6. Схема разрезки опытного транспедикулярного винта

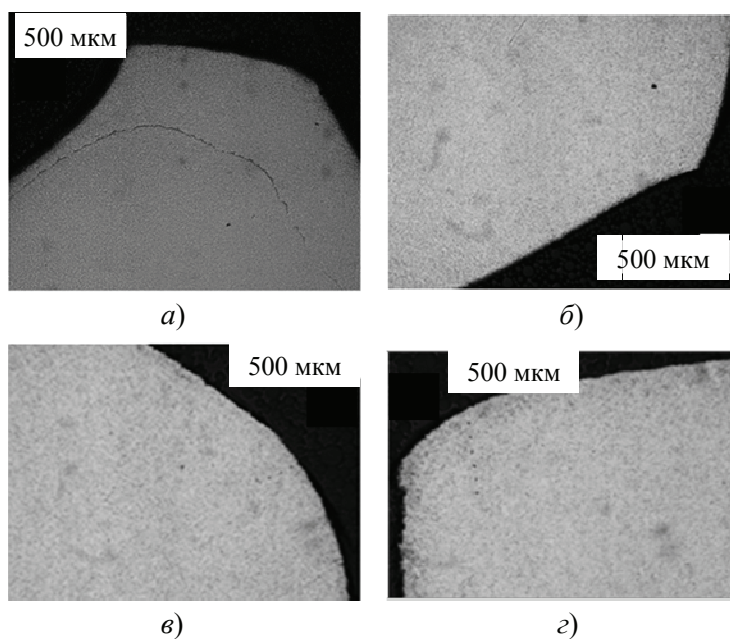


Рис. 7. Микроструктура винтов, изготовленных с углом фрезерования:
 $a - 5,5^\circ$; $б - 10^\circ$; $в - 10,6^\circ$; $д - 12,15^\circ$

Изображения микроструктуры винтов, изготовленных при резбифрезеровании под углом инструмента $5,5^\circ$ и 10° , представлены на рис. 7.

Неравномерное травление материала обнаружено в образце винта, изготовленного инструментом, установленным под углом $5,5^\circ$ (см. рис. 7, *a*). На изображении видно отслоение материала по прерывистой линии, которая повторяет контур резьбы, что является недопустимым. В остальных образцах структура однородная без видимых следов отслоения. Таким образом, лучшие результаты получены при изготовлении транспедикулярного винта инструментом с углом фрезерования $10,6^\circ$ (см. рис. 7, *в*).

Заключение

В работе проведено экспериментальное исследование влияния угла резбифрезерования на качество винтовой поверхности транспедикулярного винта. Установлено, что угол резбифрезерования оказывает непосредственное влияние на шероховатость получаемой поверхности. На установленных параметрах рез-

бофрезерования удалось достичь минимальных значений шероховатости поверхности $Ra = 0,4109$ мкм.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при выборе оптимального угла резьбофрезерования, обеспечивающего требуемое качество поверхности при изготовлении транспедикулярных винтов.

Полученные данные свидетельствуют о необходимости проведения дополнительных исследований в целях построения математической модели зависимости шероховатости Ra от режимов резания и угла резьбофрезерования.

Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук «Повышение эффективности технологии изготовления медицинских имплантов из титановых сплавов», № МК-2982.2022.4.

Список литературы

1. Бердюгин, К. А. Осложнения транспедикулярной фиксации позвоночника и их профилактика / К. А. Бердюгин, М. С. Каренин // *Фундаментальные исследования*. – 2010. – № 9. – С. 61 – 71.
2. Мамонтов, В. А. Методика оценки долговечности коленчатого вала судового ДВС по реальному профилю микронеровностей его поверхностей / В. А. Мамонтов, О. Н. Синельщикова // *Вестник Астраханского государственного технического университета*. – 2008. – № 5(46). – С. 50 – 54.
3. Hsu, C.-C. Comparison of Multiple Linear Regression and Artificial Neural Network in Developing the Objective Functions of the Orthopaedic Screws / C.-C. Hsu, J. Lin, C.-K. Chao // *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. – 2011. – Vol. 104, No. 3. – P. 341 – 348. doi: 10.1016/j.cmpb.2010.11.004
4. Kemény, A. Osseo Integration Specified Grit Blasting Parameters / A. Kemény, I. Hajdu, D. Károly, D. Pammer // *Proc. of the Materials Today*. – 2018. – Vol. 5, No. 13. – P. 26622 – 26627. doi: 10.1016/j.matpr.2018.08.126
5. Effect of Micrometer-Scale Roughness of the Surface of Ti_6Al_4V Pedicle Screws in Vitro and in Vivo / Z. Schwartz [et al.] // *The Journal of Bone and Joint Surgery*. – 2008. – Vol. 90A, No. 11. – P. 2485 – 2498. doi: 10.2106/JBJS.G.00499
6. Bulbule, M. Automated Production of Medical Screws Using Titanium Bar on Indigenous Sliding Headstock Automat / M. Bulbule, N. Hosamani, S. R. Chandramouli // *Proc. of AIMTDR, Advances in Forming, Machining and Automation*. – Springer, Singapore, 2018. – P. 709 – 722. doi:10.1007/978-981-32-9417-2_60
7. Серебренникова, А. Г. Обеспечение качества поверхности и производительности обработки при фрезеровании титановых сплавов BT20 и BT22 / А. Г. Серебренникова, А. В. Савилов // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. – 2020. – № 6(108). – С. 33 – 36. doi: 10.30987/2223-4608-2020-6-33-36
8. Savilov, A. V. Investigation of Output Parameters of Titanium Reverse Turning / A. V. Savilov, V. M. Svinin, S. A. Timofeev // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1015, No. 4. – P. 042055. doi: 10.1088/1742-6596/1015/4/042055
9. La Rosa, G. Experimental Analysis of Pedicle Screws / G. La Rosa, C. Clienti, R. Mineo, A. L. Audenino // *Procedia Structural Integrity*. – 2016. – Vol. 2, No. 10. – P. 1244 – 1251. doi: 10.1016/j.prostr.2016.06.159
10. ГОСТ 2789–73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. – Введ. 1975-01-01. – М.: Стандартинформ, 2018. – 6 с.

11. ГОСТ Р 50582–93. Имплантаты для хирургии. Металлические костные шурупы со специальной резьбой, сферической головкой и внутренним шестигранным под ключ. Размеры. – Введ. 1995-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1993. – 10 с.

Investigation of the Quality of the Threaded Surface of Pedicle Screws

A. S. Pyatykh¹, S. A. Timofeev², V. A. Ushakov¹

Department of Technology and Equipment of Machine-Building Industries (1), pyatykhas@ex.istu.edu, Research Laboratory “Technologies of High-Performance Machining” (2), Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Keywords: turning; pedicle screw; thread; roughness; titanium alloys; cutting parameters.

Abstract: The purpose of this paper is to study the parameters of surface treatment of pedicle screws. Titanium alloy VT6 and a whirl cutting head with replaceable carbide inserts were used as materials. Machining was performed on a longitudinal turning lathe. In the process of manufacturing pedicle screws, the influence of the angle of inclination of the thread-cutting head was evaluated for the roughness of the screw surface. The roughness was controlled using an optical profilometer. The roughness parameter *Ra* was used as the setting parameter. The microstructure of the pedicle rifles was used on a light metallographic microscope in a bright field when collected from 100 to 1000 times. As a result of the experiments, a certain angle of inclination of the threading head was determined in terms of studying the surface roughness of the pedicle screw.

References

1. Berdyugin K.A., Karenin M.S. [Complications of transpedicular fixation of the spine and their prevention], *Fundamental'nyye issledovaniya* [Fundamental research], 2010, no. 9, pp. 61-71. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Mamontov V.A., Sinel'shchikova O.N. [A method for assessing the durability of the crankshaft of a marine internal combustion engine based on the real profile of microroughness of its surfaces], *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Astrakhan State Technical University], 2008, no. 5(46), pp. 50-54. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Hsu C.-C., Lin J., Chao C.-K. Comparison of multiple linear regression and artificial neural network in developing the objective functions of the orthopaedic screws. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2011, vol. 104, no. 3, pp. 341-348. doi: 10.1016/j.cmpb.2010.11.004
4. Kemény A., Hajdu I., Károly D., Pammer D. Osseointegration specified grit blasting parameters, *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, no. 13, pp. 26622-26627. doi: 10.1016/j.matpr.2018.08.126
5. Schwartz Z., Raz P., Zhao G., Barak Y., Tauber M., Yao H., Boyan B.D. Effect of Micrometer-Scale Roughness of the Surface of Ti₆Al₄V Pedicle Screws in Vitro and in Vivo, *The Journal of Bone and Joint Surgery*, 2008, vol. 90A, no. 11, pp. 2485-2498. doi: 10.2106/JBJS.G.00499

6. Bulbule M., Hosamani N., Chandramouli S.R. Automated production of medical screws using titanium bar on indigenous sliding headstock automat, In book: *Advances in Forming, Machining and Automation, Proceedings of AIMTDR*, 2018, pp.709-722. doi:10.1007/978-981-32-9417-2_60

7. Serebrennikova A.G., Savilov A.V. [Assurance of surface quality and productivity of machining at milling titanium alloys VT20 and VT22], *Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii* [Science-intensive technologies in mechanical engineering], 2020, no. 6(108), pp.33-36. doi: 10.30987/2223-4608-2020-6-33-36 (In Russ., abstract in Eng.).

8. Savilov A.V., Svinin V.M. Timofeev S.A. Investigation of Output Parameters of Titanium Reverse Turning, *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1015, no. 4, p. 042055, doi: 10.1088/1742-6596/1015/4/042055

9. Rosa G. La, Clienti C., Mineo R., Audenino A. Experimental analysis of pedicle screws, *Procedia Structural Integrity*, 2016, vol. 2, no. 10, pp. 1244-1251. doi: 10.1016/j.prostr.2016.06.159

10. GOST 2789-73. *Sherokhovatost' poverkhnosti. Parametry i kharakteristiki* [Surface roughness. Parameters and characteristics], Moscow: Standartinform, 2018, 6 p. (In Russ.).

11. GOST R 50582-93. *Implantaty dlya khirurgii. Metallicheskiye kostnyye shurupy so spetsial'noy rez'boy, sfericheskoy golovkoy i vnutrennim shestigrannikom pod klyuch. Razmery* [Implants for surgery. Metal bone screws with special thread, spherical head and turnkey internal hexagon. Dimensions], Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1993, 10 p. (In Russ.).

Untersuchung der Qualität der Gewindefläche von Pedikelschrauben

Zusammenfassung: Es ist der Einfluss von Bearbeitungsparametern auf die Qualität der Gewindeoberfläche von Pedikelschrauben untersucht. Als Werkstückmaterial kam die Titanlegierung VT6 zum Einsatz, ein Kopf zum Wirbelgewindeschneiden mit auswechselbaren Hartmetalleinsätzen. Die Bearbeitung erfolgte auf einer Längsdrehbank. Bei der Herstellung transpedikulärer Schrauben ist der Einfluss des Neigungswinkels des Gewindeschneidkopfes auf die Rauheit der Schraubenoberfläche bewertet. Die Rauigkeit ist unter Verwendung des optischen Profilometers kontrolliert. Als kontrollierter Parameter ist der Rauheitsparameter *Ra* betrachtet. Die Mikrostruktur von Pedikelschrauben ist auf einem leichten metallographischen Mikroskop im Hellfeld bei 100- bis 1000-facher Vergrößerung untersucht. Als Ergebnis der Versuche ist ein rationaler Neigungswinkel des Gewindeschneidkopfes im Hinblick auf die Auswirkung auf die Oberflächenrauigkeit der Pedikelschraube ermittelt.

Étude de la qualité de la surface fileté des vis transpédiculaires

Résumé: Est étudiée l'influence des paramètres d'usinage sur la qualité de la surface fileté des vis transpédiculaires. En qualité de matériau de la pièce sont utilisés l'alliage de titane WT6, la tête de filetage vortex avec des plaquettes en carbure remplaçables. L'usinage est effectué sur un tour de tournage longitudinal. Dans le processus de la fabrication des vis transpédiculaires, est évaluée l'influence de l'angle

d'inclinaison de la tête de filetage sur la rugosité de la surface de la vis. Le contrôle de la rugosité est effectué à l'aide d'un profilomètre optique. Le paramètre de rugosité Ra est considéré comme un paramètre contrôlé. Est étudiée la microstructure des vis transpédiculaires sur un microscope métallographique à lumière dans un champ lumineux à un grossissement de 100 à 1000 fois. À la suite des expériences, est déterminé l'angle d'inclinaison rationnel de la tête de filetage en termes d'influence sur la rugosité de la surface de la vis transpédiculaire.

Авторы: *Пятых Алексей Сергеевич* – кандидат технических наук, доцент, кафедра «Технология и оборудование машиностроительных производств»; *Тимофеев Сергей Анатольевич* – младший научный сотрудник, НИЛ «Технологии высокопроизводительной механической обработки»; *Ушаков Владислав Александрович* – студент; ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Иркутск, Россия.

Зеленков Александр Вадимович

Главный инженер проекта ООО «ВСК «ЭНЕРГОСИСТЕМА», г. Тула.

29 июня 2022 г. на заседании диссертационного совета 24.2.408.01 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитил диссертацию на тему «Система регулирования нагрузки электропривода очистного комбайна с нейросетевой идентификацией параметров» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки).

Научный руководитель – д-р техн. наук, доцент Д. М. Шпрехер.

Работа выполнена на кафедре «Электротехника и электрооборудование» ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет».

Область научных интересов: система управления электроприводом очистного комбайна и переходные процессы, возникающие в нем.

Прохоренко Наталья Андреевна

Старший преподаватель кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград.

06 октября 2022 г. на заседании диссертационного совета Д 212.260.02 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитила диссертацию на тему «Моделирование и учет структуры потоков в расчетах ректификационных колонн» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)

Научный руководитель – д-р техн. наук, профессор А. Б. Голованчиков.

Работа выполнена на кафедре «Процессы и аппараты химических и пищевых производств» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет».

Область научных интересов: моделирование структуры потоков в процессах и аппаратах химических технологий.

Соловьева Инна Александровна

Ассистент кафедры математического моделирования и информационных технологий Института математики, физики и информационных технологий ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина», г. Тамбов.

27 мая 2022 г. на заседании диссертационного совета 24.2.408.01 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитила диссертацию на тему «Автоматизированное управление токовыми режимами нанесения гальванического покрытия в ваннах со многими анодами» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки).

Научный руководитель – д-р техн. наук, профессор Ю. В. Литовка.

Работа выполнена на кафедре «Системы автоматизированной поддержки принятия решений» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

Область научных интересов: автоматизированное управление гальваническим процессом в ваннах со многими анодами при различной величине силы тока и длительности его протекания.

Указатели к тому 28, 2022

СОДЕРЖАНИЕ ТОМА 28, 2022

(по рубрикам;
в алфавитном порядке авторов)

Автоматика. Информатика. Управление. Приборы

- Абас В. М. А., Егоров С. Я.** Численные методы и алгоритмы решения задачи квадратичного назначения и их применение при объемно-планировочном проектировании производства... 412 – 427
- Абрамов А. М., Гуржин С. Г., Прошин Е. М.** Методы определения динамических характеристик интегральных АЦП (на английском языке) 186 – 192
- Алгазин Е. И.** О возможности наблюдения исследуемого параметра линейных систем автоматизации в некоторой структуре временных соотношений 251 – 259
- Алейникова К. А., Мокрозуб В. Г., Рыжков А. П., Дидрих В. Е.** Формализация задачи поддержки принятия решений при управлении качеством функционирования структурного элемента деятельности в организационно-технической системе..... 376 – 386
- Альруйшид М. Х. Х., Дмитриевский Б. С., Терехова А. А., Ишин А. А., Скворцов С. А.** Математическое моделирование и оптимальное управление процессом адсорбционного получения водорода..... 035 – 045
- Анненков А. Н., Белоусова О. В.** Анализ автоматизированной установки нанесения фоторезиста как объекта управления..... 214 – 225
- Архипов А. Е., Карпушкин С. В.** Структурно-параметрический синтез систем визуализации для тренажерных комплексов 428 – 443
- 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 – 533
- Банников А. А., Литовка Ю. В., Шишкина Г. В.** Решение задачи управления неравномерностью гальванического покрытия с использованием параллельной обработки информации .. 365 – 375
- Буракова Е. А.** Концепция управления технологической системой производства углеродных нанотрубок..... 444 – 454

CONTENTS OF VOLUME 28, 2022

(by the main topics;
in the authors alphabet)

Automation. Information Technology. Control. Instruments

- Abas V. M. A., Egorov S. Ya.** Numerical Methods and Algorithms to Solve the Problem of Quadratic Assignment and Their Application in Space-Planning Industrial Design
- Abramov A. M., Gurzhin S. G., Proshin E. M.** Methods of Determining Integral ADC Dynamic Characteristics (*in English*)
- Algazin E. I.** On the Possibility of Observing the Investigated Parameter of Linear Automation Systems in a Certain Structure of Time Relations
- Aleinikova K. A., Mokrozub V. G., Ryzhkov A. P., Diedrich V. E.** Formalization of Decision Support in Quality Management of the Structural Element Functioning in the Organizational-Technical System
- Alruishid M. Kh. Kh., Dmitrievsky B. S., Terekhova A. A., Ishin A. A., Skvortsov S. A.** Mathematical Modeling and Optimal Control of the Process of Hydrogen Adsorption Production
- Annenkov A. N., Belousova O. V.** Analysis of an Automated Installation for Applying Photoresist as a Control Object
- Arkhipov A. E., Karpushkin S. V.** Structural-Parametric Synthesis of Visualization Systems for Simulators
- 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
- Bannikov A. A., Litovka Yu. V., Shishkina G. V.** Solution of the Control Problem of Uneven Plating Using Parallel Processing of Information
- Burakova E. A.** The Concept of Managing the Process System for the Production of Carbon Nanotubes

- Волчихина М. В.** Метод адаптации параметров средств защиты информации на основе дискретного изменения амплитуды и тембра субъектов переговоров 226 – 234
- Джамбеков А. М., Дмитриевский Б. С., Терехова А. А.** Устойчивость автоматической системы регулирования уровня стабильного катализатора в стабилизационной колонне установки каталитического риформинга 235 – 241
- Диго Г. Б., Диго Н. Б.** Подбор проектных решений на этапе оптимизации в условиях неопределенности на основе функционально-параметрического подхода 006 – 016
- Залукаева Н. Ю., Грибков А. Н.** Информационно-управляющая система распределения топливных пеллет от производителя до потребителя 024 – 034
- Капелько К. В., Хохулин Э. Ю.** Алгоритм оптимизации параметров комбинированной системы электроснабжения электрических беспилотных летательных аппаратов 046 – 054
- Каштанов В. В., Немтинов В. А.** Анализ организации связи с применением беспилотных летательных аппаратов малой дальности 606 – 614
- Лебедь Н. И.** Моделирование системы управления автоматизированного электропривода измельчителя плодоовощной продукции в виртуальной симуляционной среде 205 – 213
- 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 ATmega 2560 596 – 605
- Лешелая А., Уссама Б., Шауки И., Калинин В. Ф.** Трехуровневый диодно-зажимный инвертор с генератором импульсов и широтно-импульсной модуляцией (*на английском языке*) 242 – 250
- 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 – 543
- Обухов А. Д., Патутин К. И., Назарова А. О.** Алгоритмы обработки данных в автоматических системах управления на основе компьютерного зрения 573 – 585
- Volchikhina M. V.** A Method for Adapting the Parameters of Information Security Tools Using a Discrete Change in the Amplitude and Timbre of the Subjects of Negotiations
- Dzhambekov A. M., Dmitrievsky B. S., Terekhova A. A.** Stability of an Automatic System for Controlling the Level of Stable Catalyst in the Stabilization Column of a Catalytic Reformer
- Digo G. B., Digo N. B.** Selection of Design Solutions at the Optimization Stage under Conditions of Uncertainty on the Basis of a Functional-Parametric Approach
- Zalukaeva N. Yu., Gribkov A. N.** Information and Control System of Distribution of Fuel Pellets from the Manufacturer to the Consumer
- Kapelko K. V., Khokhulin E. Yu.** Algorithm for Optimizing the Parameters of the Combined Power Supply System for Electrical Unmanned Aerial Vehicles
- Kashtanov V. V., Nemtinov V. A.** The Analysis of the Organization of Communication Using Small-Range Unmanned Aerial Vehicles
- Lebed N. I.** Modeling the Control System of an Automated Electric Drive for a Fruit and Vegetable Chopper in a Virtual Simulation Environment
- 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
- Lechelaha A., Oussama B., Chaouki I., Kalinin V. F.** A Three-Level Diode-Clamp Inverter with a Pulse Generator and Pulse width Modulation as a Case Study (*in English*)
- 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
- Obukhov A. D., Patutin K. I., Nazarova A. O.** Data Processing Algorithms in Automatic Control Systems Based on Computer Vision

- 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 – 572
- Пчелинцева И. Ю.** Система распределенной обработки информации для решения задачи снижения неравномерности гальванических покрытий 398 – 411
- Сиухин А. А., Карпушкин С. В.** Структурно-параметрический синтез системы контроля качества функционирования тренажера на основе адаптивного управления средствами имитации 387 – 397
- Сулаберидзе В. Ш., Неклюдова А. А.** Гармонизация международных и национальных форм подтверждения соответствия методик измерений 586 – 595
- 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 – 558
- Удалова А. П., Чернышов В. Н., Шишкина Г. В.** Информационно-измерительная система неразрушающего контроля теплофизических свойств трехслойных строительных конструкций 356 – 364
- Уссам Б., Лешелак А., Шауки И., Калинин В. Ф.** Разработка и внедрение новых многоуровневых инверторов на основе фотоэлектрических систем *(на английском языке)* 055 – 065
- Фролов С. В., Потлов А. Ю., Фролова Т. А.** Идентификация спекл-структур для нужд картирования потоков биологических жидкостей 017 – 023
- Ходунков В. П., Заричняк Ю. П.** Новые стационарные методы измерения теплопроводности твердых тел 455 – 465
- Шилоносков А. В.** Интеллектуальная измерительная система на основе нейросетевых технологий и нечеткой логики ... 193 – 204
- Процессы и аппараты химических и других производств. Химия**
- Балыбин Д. В., Алёхина О. В., Бернацкий П. Н.** Электрохимическое и коррозионное поведение железа в кислых хлоридных средах в присутствии пиримидина 111 – 120
- 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
- Pchelintseva I. Yu.** A Distributed Information Processing System to Solve the Problem of Reducing Electroplating Unevenness
- Siukhin A. A., Karpushkin S. V.** Structural-Parametric Synthesis of the Quality Control System for the Simulator Based on Adaptive Control of Simulation Tools
- Sulaberidze V. Sh., Neklyudova A. A.** Harmonization of International and National Forms of Confirmation of Conformity of Measurement Techniques
- 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
- Udalova A. P., Chernyshov V. N., Shishkina G. V.** Information-Measuring System for Non-Destructive Testing of Thermophysical Properties of Three-Layer Building Structures
- Ussama B., Leshelakh A., Shauki I., Kalinin V. F.** A Novel Multilevel Inverter's Design and Implementation Based on Photovoltaic Systems *(in English)*
- Frolov S. V., Potlov A. Yu., Frolova T. A.** Identification of Speckle Structures for the Needs of Mapping of Biological Fluids
- Khodunkov V. P., Zarichnyak Yu. P.** New Stationary Methods for Measuring the Thermal Conductivity of Solids
- Shilonosov A. V.** Intelligent Measuring System Based on Neural Network Technologies and Fuzzy Logic
- Chemical Engineering and Related Industries. Chemistry**
- Balybin D. V., Alyokhina O. V., Bernatsky P. N.** Electrochemical and Corrosive Behavior of Iron in Acidic Chloride Media in the Presence of Pyrimidine

- Голованчиков А. Б., Меренцов Н. А., Прохоренко Н. А.** Определение параметров структуры потоков пара и кипящего раствора в ректификационной колонне 085 – 093
- Долгунин В. Н., Власов Д. А., Пронин В. А.** Кинетика и гидродинамические условия твердофазной био-конверсии целлюлозосодержащего сырья в статико-динамическом режиме. 269 – 278
- Евсеев А. В.** Классификации нонмиксинговых смесевых компонентов, продуктов и устройств 287 – 298
- Коселева М. К., Дорняк О. Р., Широкопояс Е. Н.** Повышение эффективности процесса экстрагирования в производстве гигроскопического волокнистого материала (*на английском языке*) 094 – 102
- Липин А. А., Липин А. Г.** Кинетика высвобождения питательных веществ из гранул NPK-удобрения с полимерным покрытием 466 – 475
- Матюкин В. В., Борщев В. Я.** Исследование процесса измельчения кварцевого песка 297 – 304
- Меньшутина Н. В., Казеев И. В., Артемьев А. И., Худеев И. И., Флегонтов П. А.** Исследование извлечения биологически активных веществ из растительного сырья с помощью сверхкритических технологий 066 – 075
- Оборин А. В., Мурашов А. А.** К проектированию оборудования для пневматического уплотнения тонкодисперсных материалов 487 – 495
- Пахомов А. Н., Гатапова Н. Ц., Пахомова Ю. В.** Использование алгоритма выделения слоев в расчете кинетики сушки дисперсных продуктов на подложках 260 – 268
- Пахомов А. Н., Гатапова Н. Ц., Пахомова Ю. В.** Прогнозирование типа кинетической кривой в процессе сушки картофельной мезги 076 – 084
- Попова А. А., Шубин И. Н.** Исследование процесса высокотемпературной щелочной активации углеродного материала с дополнительным воздействием водяным паром 476 – 486
- Синютина С. Е., Шубина А. Г., Розенблюм Л. В.** Влияние тяжелых металлов и флавоноидов на метаболическую активность *Saccharomyces cerevisiae* 637 – 643
- Соколов М. В.** Влияние степени пластикации на физико-механические показатели резиновой смеси при непрерывном вальцевании 305 – 315
- Golovanchikov A. B., Merentsov N. A., Prokhorenko N. A.** Determination of the Flow Structure of Steam and Boiling Streams in the Rectification Column
- Dolgunin V. N., Vlasov D. A., Pronin V. A.** Kinetics and Hydrodynamic Conditions of Solid-Phase Bioconversion of Cellulose-Containing Raw Materials in Static-Dynamic Mode
- Evseev A. V.** Classifications of Nonmixing Components, Products and Devices
- Kosheleva M. K., Dorniyak O. R., Shirokopoyas E. N.** Improving the Efficiency of the Extraction Process in Production of Hygroscopic Fibrous Materials (*in English*)
- Lipin A. A., Lipin A. G.** Kinetics of Nutrient Release from Polymer Coated NPK Fertilizer Granules
- Matyukin V. V., Borshchev V. Ya.** A Study of the Grinding Process of Quartz Sand
- Menshutina N. V., Kazeev I. V., Artemiev A. I., Khudeev I. I., Flegontov P. A.** A Study of the Extraction of Biologically Active Substances Using Supercritical Technologies From Plant Raw Materials
- Oborin A. V., Murashov A. A.** To the Design of Equipment for Pneumatic Compaction of Fine Materials
- Pakhomov A. N., Gatapova N. Ts., Pakhomova Yu. V.** Using the Algorithm for Separating Layers in Calculating the Kinetics of Drying Disperse Products on Substrates
- Pakhomov A. N., Gatapova N. Ts., Pakhomova Yu. V.** Prediction of the Type of Kinetic Curve in the Process of Drying Potato Pulp
- Popova A. A., Shubin I. N.** Investigation of the Process of High-Temperature Alkaline Activation of Carbon Material with Additional Action of Water Vapor
- Sinyutina S. E., Shubina A. G., Rosenblum L. V.** The Effect of Heavy Metals and Flavanoids on the Metabolic Activity of *Saccharomyces Cerevisiae*
- Sokolov M. V.** The Influence of the Plasticization Degree on the Physical and Mechanical Properties of the Rubber Compound during Continuous Rolling

- Соколов М. В., Беляев П. С., Клинков А. С.** Расчет технологических и конструктивных параметров двухшнековых смесителей при минимизации технологической мощности 103 – 110
- Стенько Д. В., Капранова А. Б., Бахаева Д. Д., Федорова Д. В., Лебедев А. Е.** Анализ смешения твердого дисперсного полимерного сырья для кибер-физической поддержки рециклинга 615 – 627
- Федорова Д. В., Стенько Д. В., Бахаева Д. Д., Капранова А. Б.** Параметрическое моделирование при проектировании смесителя центробежного типа для сыпучего вторичного сырья.... 279 – 286
- Шестаков К. В.** Расчет и прогнозирование кинетических параметров массопереноса через ионообменные мембраны на основе фрикционной теории..... 628 – 636

Математика. Физика

- Нахман А. Д.** Обобщенные дробные интегралы рядов Фурье..... 496 – 506
- Осиленкер Б. П., Нахман А. Д.** Два класса операторов свертки в весовых лебеговых пространствах 644 – 661

Машиностроение. Металлообработка

- Бондаренко Н. В., Соколов М. В.** Разработка алгоритма расчета припуска на механическую обработку деталей для среды программирования Python 674 – 684
- Иванова И. В., Родионов Ю. В., Воронин Н. В., Скоморохова А. И., Пахомов А. Н., Ломовских А. Е.** Элементы расчета двигателя внутреннего сгорания на примере роторной свободно-лопастной машины 316 – 327
- Мансур В., Першин В. Ф.** Агрегаты для приготовления смеси из компонентов, склонных к сегрегации: современное состояние и перспективы. Часть I... 662 – 673
- Немтинов В. А., Парсков В. А., Борисенко А. Б., Немтинова Ю. В.** Проведение технического обслуживания и ремонта вертикально-фрезерных обрабатывающих центров с использованием программных средств 507 – 519
- Романюк Н. Н., Еднач В. Н., Козлов Р. И., Хартанович А. М., Попов А. И.** К вопросу обоснования геометрических параметров распределительной головки высевающего аппарата туковой сеялки 328 – 338

- Sokolov M. V., Belyaev P. S., Klinkov A. S.** Calculation of Process and Design Parameters of Twin Screw Mixers with Minimization of Technological Capacity
- 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
- Fedorova D. V., Stenko D. V., Bakhaeva D. D., Kapranova A. B.** Parametric Modeling in the Design of a Centrifugal Mixer for Bulk Secondary Raw Materials
- Shestakov K. V.** Calculation and Prediction of Kinetic Parameters of Mass Transfer through Ion-Exchange Membranes on the Basis of Friction Theory

Mathematics. Physics

- Nakhman A. D.** Generalized Fractional Integrals of the Fourier Series
- Osilenker B. P., Nakhman A. D.** Two Classes of Convolution Operators in Weighted Lebesgue Spaces

Mechanical Engineering. Metal Treatment

- 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
- Ivanova I. V., Rodionov Yu. V., Voronin N. V., Skomorokhova A. I., Pakhomov A. N., Lomovskikh A. E.** Elements of Calculating the Internal Combustion Engine Using the Example of a Rotary Free-Blade Machine
- Mansur V., Pershin V. F.** Apparatus for Preparing a Mixture from Components Prone to Segregation: Current Status and Prospects. Part I
- Nemtinov V. A., Parskov V. A., Borisenko A. B., Nemtinova Yu. V.** Maintenance and Repair of Vertical Milling Machining Centers Using Software Tools
- Romanyuk N. N., Ednach V. N., Kozlov R. I., Khartanovich A. M., Popov A. I.** To the Question of Substantiation of Geometric Parameters of a Distribution Head of the Seeding Unit of the Fertilizer Seeder

**Материаловедение.
Нанотехнологии**

Аль-Джарах Р. А., Аль-Машхадани А. М., Мансур В., Альдавуд С. С., Осипов А. А., Першин В. Ф. Производство графеносодержащих суспензий и концентратов каскадной эксфолиацией графита.....	139 – 152
Бахаа Э., Туголуков Е. Н. Повышение эффективности светопоглощающего покрытия солнечных коллекторов.....	162 – 171
Буракова Е. А. Управление процессом формирования катализатора для синтеза углеродных наноструктурных материалов.....	127 – 138
Верченев В. С., Мордасов Д. М., Мордасов М. Д. Исследование поведения цветных металлов в переменном магнитном поле.....	121 – 126
Столяров Р. А., Меметова А. Е., Ягубов В. С., Ткачев А. Г., Меметов Н. Р. Токопроводящие кремнийорганические материалы и покрытия с многослойными углеродными нанотрубками.....	153 – 161
Ярцев В. П., Данилов В. М. Влияние климатического старения на эксплуатационные свойства фанеры.....	339 – 347

**Наши новые профессора,
доктора и кандидаты наук**

Акулинин Е. И.	685
Аль-Бусаиди С. С. С.	688
Аль-Джарах Р. А. С.	686
Аль-Маамари Г. А. А.	687
Аль-Раммахи А. А. Х.	686
Джубари М. М. К. А.	687
Жуков В. М.	520
Залукаева Н. Ю.	688
Куди А. Н.	348
Муратова Н. С.	350
Обухов А. Д.	349
Попова А. А.	686
Сари Ф. А. О.	687
Удалова А. П.	688

**Material Science.
Nanotechnology**

Al-Jarah R. A., Al-Mashkhadani A. M., Mansur V., Aldavud S.S., Osipov A. A., Pershin V. F. Production of Graphene-Containing Suspensions and Concentrates by Cascade Exfoliation of Graphite	
Bahaa E., Tugolukov E. N. Increasing the Efficiency of the Light-Absorbing Coating of Solar Collectors	
Burakova E. A. Control of the Process for the Formation of a Catalyst for the Synthesis of Carbon Nanostructured Materials	
Verchenov V. S., Mordasov D. M., Mordasov M. D. A Study of the Behavior of Non-Ferrous Metals in a Variable Magnetic Field	
Stolyarov R. A., Memetova A. E., Yagubov V. S., Tkachev A. G., Memetov N. R. Conductive Organic Silicon Materials and Coatings Containing Multilayer Carbon Nanotubes	
Yartsev V. P., Danilov V. M. The Impact of Climatic Aging on the Performance Properties of Plywood	

**New Professors, Doctors
and Candidates of Sciences**

Akulinin E. I.
Al-Busaidi S. S. S.
Al-Jarah R. A. S.
Al-Maamari G. A. A.
Al-Rammahi A. A. H.
Jubari M. M. K. A.
Zhukov V. M.
Zalukaeva N. Yu.
Kudi A. N.
Muratova N. S.
Obukhov A. D.
Popova A. A.
Sari F. A. O.
Udalova A. P.

**АЛФАВИТНЫЙ
УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ**

**AUTHOR
INDEX**

А

Альруйшид М. Х. Х.	035 – 045
Абрамов А. М.	186 – 192
Анненков А. Н.	214 – 225
Алгазин Е. И.	251 – 259
Алейникова К. А.	376 – 386
Абас В. М. А.	412 – 427
Архипов А. Е.	428 – 443
Артемьев А. И.	066 – 075
Алёхина О. В.	111 – 120
Аль-Джарах Р. А.	139 – 152
Аль-Машхадани А. М.	139 – 152
Альдавуд С. С.	139 – 152
Аль Кнфер С. Н. А.	534 – 543
Аль-Амиди М. А. Д.	534 – 543
Аль-Хамами О. Х. Я.	534 – 543
Аксенов М. П.	596 – 605
Акулинин Е. И.	685
Аль-Бусаиди С. С. С.	688
Аль-Маамари Г. А. А.	687
Аль-Раммахи А. А. Х.	686
Аль-Джарах Р. А. С.	686

Б

Белоусова О. В.	214 – 225
Банников А. А.	365 – 375
Буракова Е. А.	127 – 138, 444 – 454
Беляев П. С.	103 – 110
Балыбин Д. В.	111 – 120
Бернацкий П. Н.	111 – 120
Бахаева Д. Д.	279 – 286
Борщев В. Я.	297 – 304
Борисенко А. Б.	507 – 519
Бахаа Э.	162 – 171
Балабанов П. В.	526 – 533
Буланова В. О.	559 – 572
Буланов Е. В.	559 – 572
Бахаева Д. Д.	615 – 627
Бондаренко Н. В.	674 – 684

В

Волчихина М. В.	226 – 234
-----------------	-----------

A

Alruishid M. Kh. Kh.
Abramov A. M.
Annenkov A. N.
Algazin E. I.
Aleinikova K. A.
Abas V. M. A.
Arkhipov A. E.
Artemiev A. I.
Alyokhina O. V.
Al-Jarah R. A.
Al-Mashkhadani A. M.
Aldavud S. S.
Al Knfer S. N. A.
Al-Amidi M. A. D.
Al-Hamami O. H. Y.
Aksenov M. P.
Akulinin E. I.
Al-Busaidi S. S. S.
Al-Maamari G. A. A.
Al-Rammahi A. A. H.
Al-Jarah R. A. S.

B

Belousova O. V.
Bannikov A. A.
Burakova E. A.
Belyaev P. S.
Balybin D. V.
Bernatsky P. N.
Bakhaeva D. D.
Borshchev V. Ya.
Borisenko A. B.
Bahaa E.
Balabanov P. V.
Bulanova V. O.
Bulanov E. V.
Bakhaeva D. D.
Bondarenko N. V.

V

Volchikhina M. V.

Власов Д. А.	269 – 278	Vlasov D. A.
Воронин Н. В.	316 – 327	Voronin N. V.
Верченев В. С.	121 – 126	Verchenov V. S.
Г		G
Грибков А. Н.	024 – 034	Gribkov A. N.
Гуржин С. Г.	186 – 192	Gurzhin S. G.
Гатапова Н. Ц.	076 – 084, 260 – 268	Gatapova N. Ts.
Голованчиков А. Б.	085 – 093	Golovanchikov A. B.
Гогорян М. Л.	534 – 543	Gogoryan M. L.
Д		D
Диго Г. Б.	006 – 016	Digo G. B.
Диго Н. Б.	006 – 016	Digo N. B.
Дмитриевский Б. С.	035 – 045, 235 – 241, 534 – 543	Dmitrievsky B. S.
Джамбеков А. М.	235 – 241	Dzhambekov A. M.
Дидрих В. Е.	376 – 386	Diedrich V. E.
Дорняк О. Р.	094 – 102	Dornyak O. R.
Долгунин В. Н.	269 – 278	Dolgunin V. N.
Данилов В. М.	339 – 347	Danilov V. M.
Дивин А. Г.	526 – 533	Divin A. G.
Дмитриев Д. Г.	534 – 543	Dmitriev D. G.
Джубари М. М. К. А.	687	Jubari M. M. K. A.
Е		E
Егоров С. Я.	412 – 427	Egorov S. Ya.
Евсеев А. В.	287 – 298	Evseev A. V.
Еднач В. Н.	328 – 338	Ednach V. N.
Егоров А. С.	526 – 533	Egorov A. S.
Ж		Zh
Жуков В. М.	520	Zhukov V. M.
Жиркова А. А.	526 – 533	Zhirkova A. A.
З		Z
Залукаева Н. Ю.	024 – 034, 688	Zalukaeva N. Yu.
Заричняк Ю. П.	455 – 465	Zarichnyak Yu. P.
И		I
Ишин А. А.	035 – 045	Ishin A. A.
Иванова И. В.	316 – 327	Ivanova I. V.
К		K
Капелько К. В.,	046 – 054	Kapelko K. V.
Калинин В. Ф.	055 – 065, 242 – 250	Kalinin V. F.
Карпушкин С. В.	387 – 397, 428 – 443	Karpushkin S. V.
Казеев И. В.	066 – 075	Kazeev I. V.
Кошелева М. К.	094 – 102	Kosheleva M. K.
Клинков А. С.	103 – 110	Klinkov A. S.
Капранова А. Б.	279 – 286, 615 – 627	Kapranova A. B.
Козлов Р. И.	328 – 338	Kozlov R. I.
Куди А. Н.	348	Kudi A. N.

Карманова О. В.	544 – 558	Karmanova O. V.
Каштанов В. В.	606 – 614	Kashtanov V. V.
Л		L
Лешелах А.	055 – 065, 242 – 250	Leshelakh A.
Лебедь Н. И.	205 – 213, 596 – 605	Lebed N. I.
Литовка Ю. В.	365 – 375	Litovka Yu. V.
Липин А. А.	466 – 475	Lipin A. A.
Липин А. Г.	466 – 475	Lipin A. G.
Ломовских А. Е.	316 – 327	Lomovskikh A. E.
Линцова Е. В.	544 – 558	Lintsova E. V.
Лебедев А. Е.	615 – 627	Lebedev A. E.
М		M
Мокрозуб В. Г.	376 – 386	Mokrozub V. G.
Меньшугина Н. В.	066 – 075	Menshutina N. V.
Меренцов Н. А.	085 – 093	Merentsov N. A.
Матюкин В. В.	297 – 304	Matyukin V. V.
Мурашов А. А.	487 – 495	Murashov A. A.
Мордасов Д. М.	121 – 126	Mordasov D. M.
Мордасов М. Д.	121 – 126	Mordasov M. D.
Мансур В.	139 – 152, 662 – 673	Mansur V.
Меметова А. Е.	153 – 161	Memetova A. E.
Меметов Н. Р.	153 – 161	Memetov N. R.
Муратова Н. С.	350	Muratova N. S.
Мищенко С. В.	526 – 533	Mishchenko S. V.
Матвейкин В. Г.	534 – 543	Matveikin V. G.
Маслов А. А.	544 – 558	Maslov A. A.
Н		N
Нахман А. Д.	496 – 506, 644 – 661	Nakhman A. D.
Немтинов В. А.	507 – 519, 606 – 614	Nemtinov V. A.
Немтинова Ю. В.	507 – 519	Nemtinova Yu. V.
Назарова А. О.	573 – 585	Nazarova A. O.
Неклюдова А. А.	586 – 595	Neklyudova A. A.
Нехорошев Д. Д.	596 – 605	Nekhoroshev D. D.
О		O
Оборин А. В.	487 – 495	Oborin A. V.
Осипов А. А.	139 – 152	Osipov A. A.
Обухов А. Д.	349, 573 – 585	Obukhov A. D.
Олейник А. С.	544 – 558	Oleinik A. S.
Осиленкер Б. П.	644 – 661	Osilenker B. P.
П		P
Потлов А. Ю.	017 – 023	Potlov A. Yu.
Прошин Е. М.	186 – 192	Proshin E. M.
Пчелинцева И. Ю.	398 – 411	Pchelintseva I. Yu.
Пахомов А. Н.	076 – 084, 260 – 268, 316 – 327	Pakhomov A. N.

Пахомова Ю. В.	076 – 084, 260 – 268	Pakhomova Yu. V.
Прохоренко Н. А.	085 – 093	Prokhorenko N. A.
Пронин В. А.	269 – 278	Pronin V. A.
Попова А. А.	476 – 486, 686	Popova A. A.
Попов А. И.	328 – 338	Popov A. I.
Парсков В. А.	507 – 519	Parskov V. A.
Першин В. Ф.	139 – 152, 662 – 673	Pershin V. F.
Пономарев С. В.	559 – 572	Ponomarev S. V.
Патутин К. И.	573 – 585	Patutin K. I.
Р		R
Рыжков А. П.	376 – 386	Ryzhkov A. P.
Родионов Ю. В.	316 – 327	Rodionov Yu. V.
Романюк Н. Н.	328 – 338	Romanyuk N. N.
Розенблум Л. В.	637 – 643	Rosenblum L. V.
С		S
Скворцов С. А.	035 – 045	Skvortsov S. A.
Сиухин А. А.	387 – 397	Siukhin A. A.
Соколов М. В.	103 – 110, 305 – 315, 674 – 684	Sokolov M. V.
Стенько Д. В.	279 – 286, 615 – 627	Stenko D. V.
Скоморохова А. И.	316 – 327	Skomorokhova A. I.
Столяров Р. А.	153 – 161	Stolyarov R. A.
Сулаберидзе В. Ш.	586 – 595	Sulaberidze V. Sh.
Синютина С. Е.	637 – 643	Sinyutina S. E.
Сари Ф. А. О.	687	Sari F.A.O.
Т		T
Терехова А. А.	035 – 045, 235 – 241, 534 – 543	Terekhova A. A.
Ткачев А. Г.	153 – 161	Tkachev A. G.
Туголуков Е. Н.	162 – 171	Tugolukov E. N.
Тихомиров С. Г.	544 – 558	Tikhomirov S. G.
Токарев К. Е.	596 – 605	Tokarev K. E.
У		U
Уссама Б.	055 – 065, 242 – 250	Ussama B.
Удалова А. П.	356 – 364, 688	Udalova A. P.
Ф		F
Фролов С. В.	017 – 023	Frolov S. V.
Фролова Т. А.	017 – 023	Frolova T. A.
Флегонтов П. А.	066 – 075	Flegontov P. A.
Федорова Д. В.	279 – 286, 615 – 627	Fedorova D. V.
Х		Kh
Хохулин Э. Ю.	046 – 054	Khokhulin E. Yu.

Ходунков В. П.	455 – 465	Khodunkov V. P.
Худеев И. И.	066 – 075	Khudeev I. I.
Хартанович А. М.	328 – 338	Khartanovich A. M.
Хаустов И. А.	544 – 558	Khaustov I. A.
Ч		Ch
Чернышов В. Н.	356 – 364	Chernyshov V. N.
Ш		Sh
Шауки И.	055 – 065, 242 – 250	Shauki I.
Шилоносов А. В.	193 – 204	Shilonosov A. V.
Шишкина Г. В.	356 – 364, 365 – 375, 526 – 533	Shishkina G. V.
Широкопояс Е. Н.	094 – 102	Shirokopoyas E. N.
Шубин И. Н.	476 – 486	Shubin I. N.
Шестаков К. В.	628 – 636	Shestakov K. V.
Шубина А. Г.	637 – 643	Shubina A. G.
Я		Ya
Ягубов В. С.	153 – 161	Yagubov V. S.
Ярцев В. П.	339 – 347	Yartsev V. P.

