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

ВЕСТНИК Тамбовского государственного технического университета

TRANSACTIONS of the Tambov State Technical University

2022. Том 28. № 3.

Четырехъязычный научно-теоретический и прикладной журнал широкого профиля

Four-Language Scientific-Theoretical and Applied Multidisciplinary Journal

Основан в 1995 году

Выходит 4 раза в год

http://vestnik.tstu.ru

Россия Тамбов
Издательство ТГТУ

Совет редакторов

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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 обл., г. Тамбов, ул. Советская, д. 106/5, пом. 2.
Редакция журнала «Вестник Тамбовского государственного технического университета».
Эл. почта: gatapova.nc@mail.tstu.ru

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

Подписано в печать 20.10.2022. Дата выхода в свет 02.11.2022.
Формат 70×108/16. Усл. печ. л. 14,88; уч.-изд. л. 17,00. Тираж 100 экз. Цена свободная. Заказ 042.
Адрес типографии: 392032, Тамбовская обл., г. Тамбов, ул. Мичуринская, д. 112А. Тел. (4752) 63 07 46

ISSN 0136-5835
e-ISSN 2542-1409
Знак информационной продукции 16+

© ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2022
© Коллектив авторов, 2022

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Издатель: ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Адрес издателя: 392000, Тамбовская обл., г. Тамбов, ул. Советская, д. 106/5, пом. 2.
E-mail: tstu@admin.tstu.ru

Средство массовой информации 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 356

Удалова А. П., Чернышов В. Н., Шишкина Г. В. Информационно-измерительная система неразрушающего контроля теплофизических свойств трехслойных строительных конструкций 356

Банников А. А., Литовка Ю. В., Шишкина Г. В. Решение задачи управления неравномерностью гальванического покрытия с использованием параллельной обработки информации 365

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

Сиухин А. А., Карпушкин С. В. Структурно-параметрический синтез системы контроля качества функционирования тренажера на основе адаптивного управления средствами имитации 387

Пчелинцева И. Ю. Система распределенной обработки информации для решения задачи снижения неравномерности гальванических покрытий 398

Абас В. М. А., Егоров С. Я. Численные методы и алгоритмы решения задачи квадратичного назначения и их применение при объемно-планировочном проектировании производства 412

Архипов А. Е., Карпушкин С. В. Структурно-параметрический синтез систем визуализации для тренажерных комплексов 428

Буракова Е. А. Концепция управления технологической системой производства углеродных нанотрубок 444

Ходунков В. П., Заричняк Ю. П. Новые стационарные методы измерения теплопроводности твердых тел 455

Процессы и аппараты химических и других производств. Химия 466

Липин А. А., Липин А. Г. Кинетика высвобождения питательных веществ из гранул NPK-удобрения с полимерным покрытием 466

Попова А. А., Шубин И. Н. Исследование процесса высокотемпературной щелочной активации углеродного материала с дополнительным воздействием водяным паром 476

Оборин А. В., Мурашов А. А. К проектированию оборудования для пневматического уплотнения тонкодисперсных материалов 487

Математика. Физика 496

Нахман А. Д. Обобщенные дробные интегралы рядов Фурье 496

Машиностроение. Металлообработка 507

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

Наши новые профессора, доктора и кандидаты наук 520

CONTENTS

Automation. Information Technology. Control. Instruments 356

Udalova A. P., Chernyshov V. N., Shishkina G. V. Information-Measuring System for Non-Destructive Testing of Thermophysical Properties of Three-Layer Building Structures 356

Bannikov A. A., Litovka Yu. V., Shishkina G. V. Solution of the Control Problem of Uneven Plating Using Parallel Processing of Information 365

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 376

Siukhin A. A., Karpushkin S. V. Structural-Parametric Synthesis of the Quality Control System for the Simulator Based on Adaptive Control of Simulation Tools 387

Pchelintseva I. Yu. A Distributed Information Processing System to Solve the Problem of Reducing Electroplating Unevenness 398

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 412

Arkhipov A. E., Karpushkin S. V. Structural-Parametric Synthesis of Visualization Systems for Simulators 428

Burakova E. A. The Concept of Managing the Process System for the Production of Carbon Nanotubes 444

Khodunkov V. P., Zarichnyak Yu. P. New Stationary Methods for Measuring the Thermal Conductivity of Solids 455

Chemical Engineering and Related Industries. Chemistry 466

Lipin A. A., Lipin A. G. Kinetics of Nutrient Release from Polymer Coated NPK Fertilizer Granules 466

Popova A. A., Shubin I. N. Investigation of the Process of High-Temperature Alkaline Activation of Carbon Material with Additional Action of Water Vapor 476

Oborin A. V., Murashov A. A. To the Design of Equipment for Pneumatic Compaction of Fine Materials 487

Mathematics. Physics 496

Nakhman A. D. Generalized Fractional Integrals of the Fourier Series 496

Mechanical Engineering. Metal Treatment 507

Nemtinov V. A., Parskov V. A., Borisenko A. B., Nemtinova Yu. V. Maintenance and Repair of Vertical Milling Machining Centers Using Software Tools 507

New Professors, Doctors and Candidates of Sciences 520

УДК 681.5.017 ; 536.2.083
DOI: 10.17277/vestnik.2022.03.pp.356-364

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТРЕХСЛОЙНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

А. П. Удалова[1], В. Н. Чернышов[2], Г. В. Шишкина[3]

*Кафедры: «Радиотехника» (1), udalova.tmb@yandex.ru;
«Уголовное право и прикладная информатика в юриспруденции» (2),
«Мехатроника и технологические измерения» (3),
ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: информационно-измерительная система; неразрушающий контроль; СВЧ-нагрев; температуропроводность; теплопроводность; теплофизические свойства материалов.

Аннотация: Представлена информационно-измерительная система (ИИС), позволяющая с необходимой для технологических измерений точностью осуществлять неразрушающий контроль теплофизических свойств (ТФС) трехслойных строительных конструкций. Отличительной особенностью предложенной ИИС является прогрев исследуемых материалов на заданную глубину, за счет чего тепловому воздействию подвергается большой объем исследуемых композитных строительных материалов, являющихся, как правило, гетерогенными и неоднородными, что необходимо для более точного определения их ТФС. Для осуществления нагрева исследуемых объектов энергией СВЧ-излучения в предложенной ИИС используются рупорно-линзовые антенны, параметры которых рассчитаны для формирования необходимого режима нагрева, вида и формы теплового воздействия.

Введение

В настоящее время остро стоит задача рационального использования топливно-энергетических ресурсов, для решения которой в строительной отрасти находят применение вновь синтезируемые теплоизоляционные материалы, обладающие более низкими коэффициентами тепло- и температуропроводности. Для контроля значений данных показателей, как в процессе производства, так и на стадии эксплуатации готовых изделий, необходимо применение информационно-измерительной системы (**ИИС**) неразрушающего контроля (**НК**) теплофизических свойств (**ТФС**) строительных материалов и готовых конструкций. Однако

систем, позволяющих без нарушения целостности исследуемых объектов с необходимой для строительной теплотехники точностью определять теплозащитные свойства материалов и готовых конструкций, достаточно мало. Тем не менее наиболее перспективными среди них являются ИИС, использующие электромагнитную энергию СВЧ-диапазона для осуществления нагрева исследуемых объектов [1 – 4]. Такой вид источника теплового воздействия позволяет существенно повысить точность измерений и сохранить целостность и эксплуатационные характеристики исследуемых строительных объектов.

Цель работы – создание ИИС, позволяющих с необходимой для технологических измерений точностью осуществлять НК ТФС трехслойных строительных конструкций.

Материалы и методы

Рассмотрим ИИС, реализующую метод неразрушающего контроля ТФС трехслойных строительных конструкций [5], в котором при определении ТФС наружных слоев рассчитывают частоту СВЧ-излучения, необходимую для прогрева 2/3 толщины исследуемого слоя, что не допускает влияния ТФС внутреннего слоя на результаты измерений и позволяет прогреть большой объем исследуемого материала для получения среднеинтегральных по объему значений искомых ТФС. Осуществление теплового воздействия под заданным углом θ' к поверхности исследуемого наружного слоя позволяет учесть двумерность теплового потока, что повышает точность измерений, а учет тепловых потерь в окружающую среду, возникающих вследствие отражения части энергии от поверхности исследуемого объекта, позволяет повысить точность измерений. При определении ТФС внутреннего слоя нагрев осуществляется через круговую область на поверхности исследуемой конструкции СВЧ-излучением с частотой, рассчитанной на прогрев 4…5 мм наружного слоя исследуемой конструкции. При этом приповерхностный слой исследуемой конструкции выполняет роль нагревателя, что исключает влияние на результаты измерений контактного термосопротивления между поверхностью традиционного нагревателя и исследуемого объекта, которое зависит от степени прижатия нагревателя к поверхности, шероховатости поверхности, что также повышает достоверность определения искомых ТФС.

Одним из основных блоков ИИС при определении ТФС наружных слоев является рупорно-линзовая антенна, которая позволяет получить максимально узкую диаграмму направленности, обеспечивающую линию теплового воздействия длиной 0,08…0,1 м. Для получения такой диаграммы направленности проведен расчет параметров линзы и облучателя.

Если поместить в фокусе линзы источник сферической волны, то расходящийся пучок лучей при прохождении сквозь толщу линзы при правильном подборе формы ее профиля вследствие последовательных преломлений трансформируется в семейство параллельных лучей, образуя плоский фронт.

Фазовая скорость волны в линзе зависит от ее коэффициента преломления n. Если $n > 1$, то линза называется замедляющей (рис. 1, *а*), если $n < 1$ – ускоряющей (рис. 1, *б*). Замедляющие линзы выполняются из диэлектрика, а ускоряющие – из параллельных металлических пластин. Существенным недостатком линз из металлических пластин, по сравнению с диэлектрическими, являются ограниченность диапазона использования. Поэтому для реализации предложенного метода выбрана замедляющая линза, а в качестве материала диэлектрика – фторопласт. Кроме того, преимуществами диэлектрических линз являются некритичность

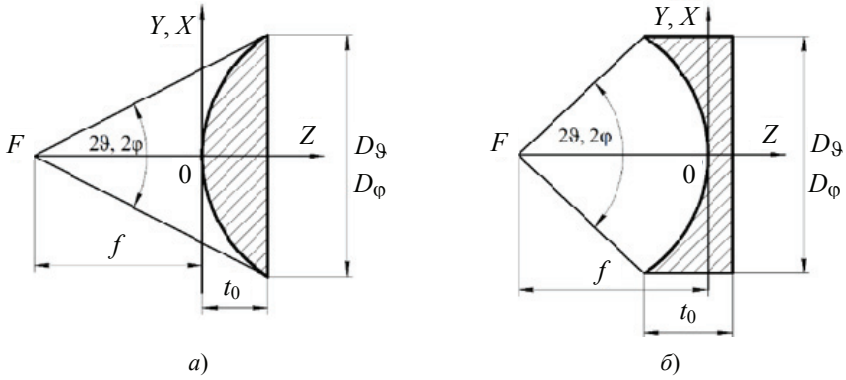


Рис. 1. Линзовые антенны:
а – замедляющая; *б* – ускоряющая

к поляризации поля (они фокусируют волну любой поляризации) и широкодиапазонность, обусловленная слабой зависимостью коэффициента преломления диэлектрика от частоты.

Для расчета параметров диэлектрической линзы воспользуемся методикой, представленной в работе [6].

В соответствии со справочными данными, касающимися геометрических и электрических параметров волноводов прямоугольного сечения, стандартизованных Международной электротехнической комиссией (**МЭК**), представленными в [7], выбран волновод типа МЭК-180.

Геометрические размеры излучающего раскрыва линзы D_ϑ и D_φ в главных плоскостях определяются соотношениями:

$$D_\vartheta = \frac{\lambda A^*}{2\vartheta_{p/2}}; \quad D_\varphi = \frac{\lambda A^*}{2\varphi_{p/2}}, \tag{1}$$

где λ – длина волны; A^* – коэффициент, учитывающий закон распределения амплитуды поля на излучающем раскрыве в соответствующей плоскости, выбирается в соответствии с данными, представленными в [8, 9]; $\vartheta_{p/2}$, $\varphi_{p/2}$ – ширина диаграммы направленности в главных ортогональных плоскостях.

Коэффициент преломления n замедляющей диэлектрической линзы находится в соответствии с соотношением

$$n = \sqrt{\varepsilon} > 1, \tag{2}$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость материала, из которого изготовлена замедляющая линза. Для фторопласта относительная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 2$ Ф/м. Следовательно, коэффициент преломления $n = 1{,}4$.

Фокусное расстояние f и толщина замедляющей линзы t_0 определяются соответственно по формулам:

$$f = \frac{\sqrt{D_\vartheta^2 + D_\varphi^2}}{2}\sqrt{\frac{n+1}{n-1}}; \tag{3}$$

$$t_0 = -\frac{f}{n+1} + \sqrt{\left(\frac{f}{n+1}\right)^2 + \frac{D_\vartheta^2 + D_\varphi^2}{4\left(n^2-1\right)}}. \quad (4)$$

Таким образом, необходимая для реализации ИИС диэлектрическая линза имеет следующие параметры:

– геометрические размеры линзы: D_ϑ = 0,021 м; D_φ = 0,812 м;

– фокусное расстояние f = 0,98 м;

– толщина линзы t_0 = 0,168 м.

В качестве облучателя линзовой антенны выбран пирамидальный рупор. Размеры раскрыва рупора $a_р$ и $b_р$ определяется по формулам

$$2\vartheta_{p/2} = \frac{78°\lambda}{a_р}; \quad 2\varphi_{p/2} = \frac{56°\lambda}{b_р}. \quad (5)$$

Из (5) находим, что размеры раскрыва рупора $a_р$ и $b_р$ равны соответственно 0,026 м и 0,73 м.

Для определения ТФС внутреннего слоя необходимо определить параметры рупорно-линзовой антенны, фокусирующей СВЧ-излучение в область в виде круга диаметром 0,1 м. Для создания рупорно-линзовой антенны выбран материал диэлектрика линзы фторопласт и облучатель в виде конического рупора. Расчет параметров данной антенны осуществлялся также по методике, представленной в [6]. Из справочника [7] выбран тип волновода МЭК-900.

Требуется сформировать осесимметричную диаграмму направленности, то есть ширина диаграммы направленности в главных ортогональных плоскостях будет одинакова: $2\vartheta_{p/2} = 2\varphi_{p/2}$. Соответственно, геометрические размеры излучающего раскрыва линзы D_ϑ и D_φ в главных плоскостях, определяющиеся соотношениями (1), будут равны. Коэффициент A^* выбирается из [8, 9].

Фокусное расстояние для замедляющей диэлектрической линзы выбираем в соответствии с формулой

$$f = R\sqrt{\frac{n+1}{n-1}}, \quad (6)$$

где R – радиус линзы.

Толщина замедляющей линзы определяется по формуле

$$t_0 = -\frac{f}{n+1} + \sqrt{\left(\frac{f}{n+1}\right)^2 + \frac{R^2}{n^2-1}}. \quad (7)$$

Таким образом, необходимая диэлектрическая линза имеет следующие параметры:

– геометрические размеры линзы: $D_\vartheta = D_\varphi$ = 0,022 м;

– фокусное расстояние f = 0,027 м;

– толщина линзы $t_0 = 4{,}591 \cdot 10^{-3}$ м.

В качестве облучателя выбран конический рупор, размер раскрыва которого находится из формулы

$$2\vartheta_{p/2} = \frac{60°\lambda}{2a_р}. \quad (8)$$

Таким образом, размер раскрыва рупора составляет 0,039 м. Длина рупора берется примерно равной фокусному расстоянию линзы. Линза устанавливается в раскрыв рупора. Расстояние между поверхностью исследуемого объекта и раскрывом линзы составляет 0,5 м.

Результаты и обсуждение

Алгоритм работы ИИС НК ТФС трехслойных строительных конструкций заключается в следующем. После ввода исходных данных: мощности генератора Q; расстояния от линии теплового воздействия до точек контроля значений избыточной температуры x_1, x_2; времени осуществления теплового воздействия τ^*; толщин первого, второго и третьего слоев соответственно R_1, R_2, R_3 исследуемой строительной конструкции; величины абсолютной магнитной проницаемости μ_0; относительной магнитной проницаемости μ и диэлектрической проводимости γ материала верхнего слоя исследуемой конструкции, компьютер рассчитывает необходимую для прогрева 2/3 толщины исследуемого наружного слоя частоту СВЧ-излучения и угол наклона θ' рупорной линзовой антенны к поверхности исследуемого объекта. По команде компьютера через порт ввода-вывода генератор СВЧ-излучения осуществляет тепловое воздействие под углом θ' с найденной частотой СВЧ-излучения. В заданный момент времени τ^* по команде компьютера бесконтактные первичные измерительные преобразователи температуры осуществляют контроль значений избыточных температур в двух точках, расположенных на заданных расстояниях x_1 и x_2 от линии теплового воздействия, и через порт ввода-вывода информация о полученных значениях поступает в компьютер, где происходит расчет искомых ТФС наружного слоя.

После определения ТФС двух наружных слоев исследуемой конструкции определяют ТФС внутреннего слоя. Для этого тепловое воздействие осуществляют через круговую область. Компьютер рассчитывает необходимую частоту микроволнового воздействия, при которой глубина проникновения электромагнитной волны составляет 2…3 мм. Затем информация о найденной частоте подается на СВЧ-генератор. После начала теплового воздействия при передаче на компьютер информации о величине теплового потока и температурах на обеих наружных поверхностях в зоне теплового воздействия с первичных измерительных преобразователей температуры, величине температуры окружающей среды с цифрового термометра по известным соотношениям определяют искомые ТФС внутреннего слоя, информация о которых выводится на монитор компьютера.

Преимуществом заявленной системы является нагрев электромагнитной энергией СВЧ-диапазона, исключающий влияние собственной теплоемкости нагревателя, контактное термосопротивление между нагревателем и исследуемым объектом, степень прижатия нагревателя к объекту и шероховатость поверхности, что повышает ее точность. Кроме того, исключена возможность прогрева наружного слоя насквозь за счет прогрева исследуемого слоя на необходимую заранее рассчитанную глубину, таким образом, в нахождении ТФС наружных слоев не будут принимать участия ТФС внутреннего слоя, что также повышает точность предложенного метода.

На рисунке 2 представлена блок-схема, поясняющая работу ИИС, реализующей микроволновый метод неразрушающего контроля ТФС трехслойных строительных конструкций.

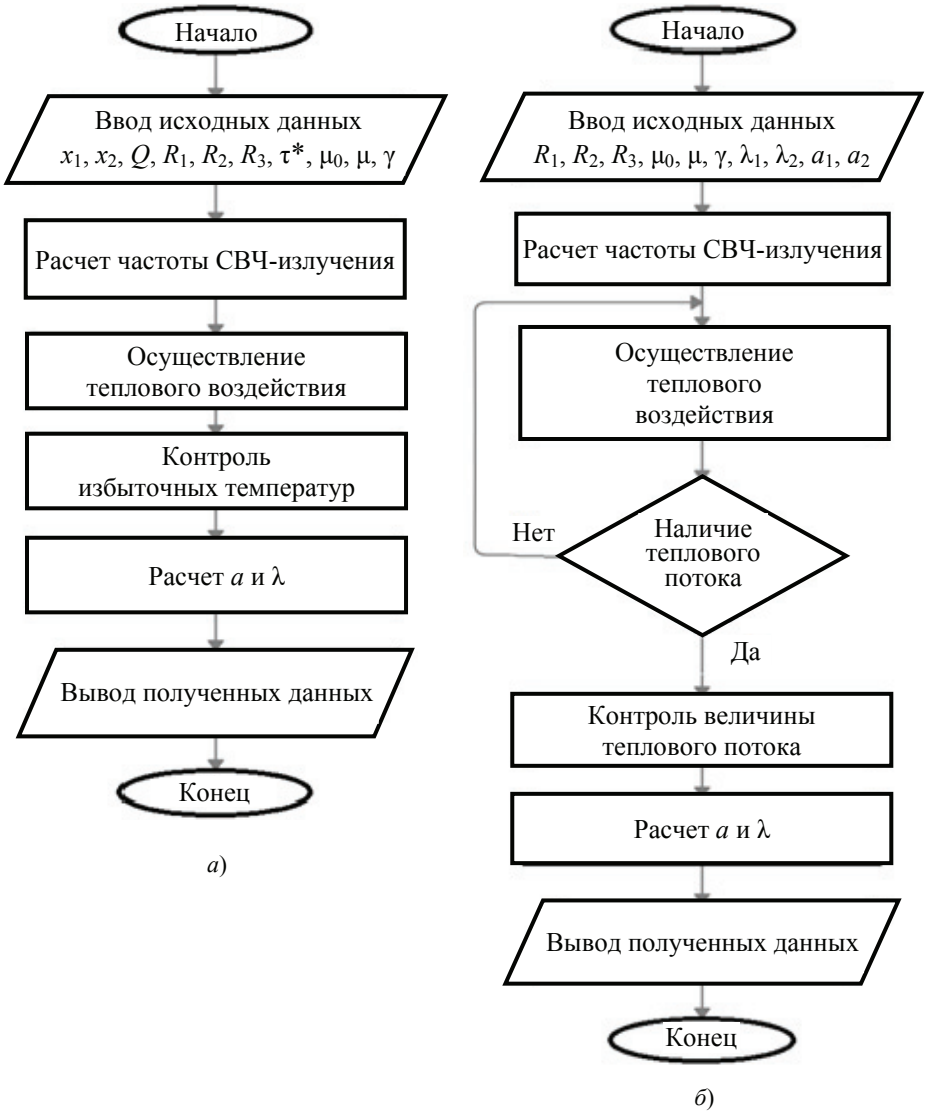


Рис. 2. Блок-схема работы ИИС НК ТФС трехслойных строительных конструкций

Заключение

Разработана ИИС, которая позволяет определять ТФС трехслойных строительных конструкций без нарушения их целостности и эксплуатационных характеристик. При определении ТФС наружных слоев система в автоматическом режиме рассчитывает частоту СВЧ-излучения, необходимую для прогрева исследуемого наружного слоя на заданную глубину, что исключает влияние на результаты измерений ТФС внутреннего слоя. Кроме того, система автоматически рассчитывает и устанавливает угол наклона антенны θ' к поверхности исследуемого объекта, осуществляет алгоритмическую коррекцию результатов измерений с учетом тепловых потерь в окружающую среду, возникающих за счет отражения части микроволнового излучения с поверхности исследуемого объекта, определяя

угол Брюстера, что повышает точность конечных результатов измерений. При определении ТФС внутреннего слоя тепловое воздействие осуществляется через круговую область, при этом система автоматически рассчитывает частоту СВЧ-излучения, при которой тепловому воздействию подвергается приповерхностный слой исследуемой строительной конструкции, выполняя роль нагревателя, исключая влияние состояния поверхности исследуемого объекта, контактного термосопротивления между нагревателем и поверхностью исследуемого объекта, собственной теплоемкости нагревателя и т.д. на результаты определения искомых ТФС, что повышает точность измерений. При разработке ИИС проведены расчеты основных параметров рупорно-линзовых антенн, позволяющих создать требуемый для разработанных методов вид теплового микроволнового воздействия за счет формирования соответствующих диаграмм направленности. Сконструированные на основе проведенного расчета рупорно-линзовые антенны являются основными и наиболее важными блоками в разработанной ИИС.

Представленная ИИС НК ТФС трехслойных строительных конструкций позволит расширить перечень исследуемых объектов и найдет применение в строительной теплотехнике при определении теплозащитных свойств зданий и сооружений.

Список литературы

1. Жарикова, М. В. Бесконтактные микроволновые методы и реализующие их системы неразрушающего контроля теплофизических характеристик строительных материалов и изделий : дис. … канд. техн. наук : 05.11.13 / Жарикова Мария Валерьевна. – Тамбов, 2016. – 134 с.

2. Голиков, Д. О. Микроволновые методы и реализующие их системы контроля теплофизических характеристик строительных материалов и изделий : дис. … канд. техн. наук : 05.11.13 / Голиков Дмитрий Олегович. – Тамбов, 2013. – 179 с.

3. Адаптивный метод неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий с применением энергии СВЧ-излучения для нагрева исследуемых объектов / В. Н. Чернышов, А. П. Негуляева, С. П. Москвитин, А. В. Чернышов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2018. – Т. 24, № 1. – С. 16 – 23. doi: 10.17277/vestnik.2018.01.pp.016-023

4. Жарикова, М. В. Энергоэффективный бесконтактный микроволновый метод неразрушающего контроля теплофизических характеристик строительных материалов и изделий / М. В. Жарикова, А. В. Чернышов, В. Н. Чернышов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 3. – С. 399 – 405. doi: 10.17277/vestnik.2015.03.pp.399-405

5. Пат. 2744606 Российская Федерация, МПК G01N 25/18. Микроволновый способ определения теплофизических характеристик многослойных конструкций и изделий / С. А. Мордасов, А. П. Негуляева, В. Н. Чернышов ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ТГТУ». – № 2020124454 ; заявл. 23.07.2020 ; опубл. 11.03.2021, Бюл. № 8 – 18 с.

6. Дорохов, А. П. Расчет и конструирование антенно-фидерных устройств / А. П. Дорохов. – Харьков : Изд-во Харьковского ун-та, 1960. – 450 с.

7. Фельдштейн, А. Л. Справочник по элементам волноводной техники / А. Л. Фельдштейн, Л. Р. Ярвич, В. П. Смирнов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Сов. радио, 1967. – 651 с.

8. Никитин, Б. Т. Антенны и устройства сверхвысоких частот. Расчет и проектирование устройств СВЧ : учеб. пособие / Б. Т. Никитин, Л. А. Федорова, Ю. Н. Данилов. – Л. : ЛИАП, 1986. – 66 с.

9. Кюн, Р. Микроволновые антенны : пер с нем. / Р. Кюн ; под ред. М. П. Долуханова. – Л. : Судостроение, 1967. – 518 с.

Information-Measuring System for Non-Destructive Testing of Thermophysical Properties of Three-Layer Building Structures

A. P. Udalova[1], V. N. Chernyshov[2], G. V. Shishkina[3]

Departments of Radio Engineering (1), udalova.tmb@yandex.ru,
Criminal Law and Applied Informatics in Jurisprudence (2),
Mechatronics and Technological Measurements (3),
TSTU, Tambov, Russia

Keywords: information-measuring system; non-destructive testing; microwave heating; thermal diffusivity; thermal conductivity; thermal-physical properties of materials.

Abstract: The paper describes an information-measuring system (IMS) that enables to carry out non-destructive testing of thermophysical properties (TPPs) of three-layer building structures with the accuracy necessary for technological measurements. A distinctive feature of the proposed IMS is the heating of the studied materials to a given depth, due to which a large volume of the investigated composite building materials, which are usually heterogeneous and inhomogeneous, are subjected to thermal action, which is necessary for a more accurate determination of their TPPs. To heat the objects under study with microwave energy, the proposed IMS uses horn-lens antennas, the parameters of which are calculated to form the required heating mode, type and form of thermal exposure.

References

1. Zharikova M.V. *PhD Dissertation (Technical)*, Tambov, 2016, 134 p. (In Russ.)
2. Golikov D.O. *PhD Dissertation (Technical)*, Tambov, 2013, 179 p. (In Russ.)
3. Chernyshov V.N., Negulyaeva A.P., Moskvitin S.P., Chernyshov A.V. [Adaptive method for non-destructive testing of thermophysical properties of materials and products using microwave energy for heating the objects under study], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2018, vol. 24, no. 1, pp. 16-23, doi: 10.17277/vestnik.2018.01.pp.016-023 (In Russ., abstract in Eng.)
4. Zharikova M.V., Chernyshov A.V., Chernyshov V.N. [Energy-efficient non-contact microwave method of non-destructive control of the thermophysical characteristics of building materials and products], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 3, pp. 399-405, doi: 10.17277/vestnik.2015.03.pp.399-405 (In Russ., abstract in Eng.)
5. Mordasov S.A., Negulyaeva A.P., Chernyshov V.N. *Mikrovolnovyy sposob opredeleniya teplofizicheskikh kharakteristik mnogosloynykh konstruktsiy i izdeliy* [Microwave method for determining the thermophysical characteristics of multilayer structures and products], Russian Federation, 2021, Pat. 2744606. (In Russ.)
6. Dorohov A.P. *Raschet i konstruirovaniye antenno-fidernykh ustroystv* [Calculation and design of antenna-feeder devices], Kharkov: Izdatel'stvo Har'kovskogo un-ta, 1960, 450 p. (In Russ.)
7. Fel'dshtejn A.L., Yarvich L.R., Smirnov V.P. *Spravochnik po elementam volnovodnoy tekhniki* [Handbook of elements of waveguide technology], Moscow: Sovetskoe radio, 1967, 651 p. (In Russ.)
8. Nikitin B. T., Fedorova L. A., Danilov Yu.N. *Antenny i ustroystva sverkhvysokikh chastot. Raschet i proyektirovaniye ustroystv SVCH : uchebnoye posobiye* [Antennas and microwave frequency devices. Calculation and design of microwave devices: textbook], Leningrad, 1986, 66 p. (In Russ.)

9. Kyun R., Dolukhanov M.P. [Ed.] *Mikrovolnovyye antenny* [Microwave Antennas], Leningrad: Sudostroenie, 1967, 518 p. (In Russ.)

Informations- und Messsystem zur zerstörungsfreien Kontrolle der thermischen physikalischen Eigenschaften von dreischichtigen Baukonstruktionen

Zusammenfassung: Es ist ein Informations- und Messsystem (IMS) vorgestellt, das es ermöglicht, mit der für technologische Messungen erforderlichen Genauigkeit zerstörungsfreie Prüfungen thermophysikalischer Eigenschaften (TPS) von dreischichtigen Baustrukturen durchzuführen. Eine Besonderheit des vorgeschlagenen IMS ist die Erwärmung der untersuchten Materialien bis zu einer bestimmten Tiefe, wodurch ein großes Volumen der untersuchten Verbundbaustoffe, die normalerweise heterogen und inhomogen sind, einer thermischen Einwirkung ausgesetzt werden, was für die genauere Bestimmung ihrer TFS notwendig ist. Um die untersuchten Objekte mit Mikrowellenenergie zu erwärmen, verwendet das vorgeschlagene IMS Hornlinsenantennen, deren Parameter berechnet werden, um den erforderlichen Erwärmungsmodus, die Art und Form der thermischen Einwirkung zu bilden.

Système d'information et de mesure pour le contrôle non destructif des propriétés thermiques des structures de construction à trois couches

Résumé: Est présenté le système d'information et de mesure (SIM) qui permet d'effectuer avec précision le contrôle non destructif des propriétés thermiques et physiques (PTP) des structures de construction à trois couches. La caractéristique distinctive de SIM proposé est le réchauffement des matériaux étudiés à une profondeur donnée. Un grand nombre de matériaux de construction composites étudiés sont exposés à la chaleur. Ce sont en general les matériaux hétérogènes ce qui est nécessaire pour une détermination plus précise de leur PTP. Pour chauffer les objets étudiés avec l'énergie du rayonnement micro-ondes dans le SIM proposé, sont utilisées des antennes à lentilles cornéennes dont les paramètres sont calculés pour former le mode de chauffage nécessaire, ainsi que le type et la forme de l'effet thermique.

Авторы: ***Удалова Анастасия Петровна*** – ассистент кафедры «Радиотехника»; ***Чернышов Владимир Николаевич*** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Уголовное право и прикладная информатика в юриспруденции»; ***Шишкина Галина Викторовна*** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Мехатроника и технологические измерения», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

УДК 621.357
DOI: 10.17277/vestnik.2022.03.pp.365-375

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ НЕРАВНОМЕРНОСТЬЮ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

А. А. Банников[1], Ю. В. Литовка[1], Г. В. Шишкина[2]

Кафедры: «Системы автоматизированной поддержки принятия решений» (1), sapr.tstu@mail.ru; «Мехатроника и технологические измерения» (2), ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия

Ключевые слова: видеокарта; гальванические покрытия; деталь; неравномерность; оптимальное размещение; распараллеливание; расчет.

Аннотация: Рассмотрена задача поиска оптимального расположения деталей-катодов на подвеске, при котором суммарная неравномерность получаемых гальванических покрытий минимальна. Предложены способы ускорения расчетов оптимального расположения при помощи современных технологий, применяемых в ЭВМ. Представлены результаты экспериментов, подтверждающие эффективность распараллеливания расчетов на видеокарте с помощью применения технологии CUDA.

Введение

Нанесение гальванических покрытий – один из наиболее распространенных способов придания покрываемой поверхности деталей специальных свойств [1 – 3]. Качество получаемых гальванических покрытий оказывает значительное влияние на качество готовых изделий и их различные эксплуатационные характеристики (долговечность, стойкость к коррозии, блеск и др.). При этом одним из важнейших показателей качества получаемого покрытия является равномерность распределения толщины наносимого металла по поверхности детали.

В гальванических цехах машиностроительных предприятий, как правило, используются линии для нанесения покрытий с ваннами объемом от 1,5 м^3 и больше. В связи с этим детали небольшого размера необходимо обрабатывать совместно, так как нерентабельно обрабатывать по одной детали за один цикл работы гальванической ванны. Совместная обработка их большого количества приводит к экономии затрачиваемых ресурсов (времени, электроэнергии и др.) [4].

При совместном нанесении гальванических покрытий используется несколько устройств для размещения деталей в электрохимической ванне, основными из которых являются барабаны и подвесочные рамы. С точки зрения получения равномерного покрытия по поверхности деталей, использование перфорированных барабанов обеспечивает хорошие значения данного показателя за счет вращения барабана и, как следствие, перемешивания деталей. При этом различные фрагменты поверхностей деталей регулярно оказываются напротив отверстий в барабане, через которые проходит ток. Данный способ используется при нанесении гальванических покрытий на мелкие детали (в основном метизы).

Рис. 1. Подвесочное устройство для обработки деталей в электрохимической ванне

Совсем иная картина наблюдается при использовании подвесочных устройств, применяемых для обработки средних и крупных деталей (рис. 1).

В зависимости от размеров электрохимической ванны, на подвеске может размещаться до нескольких десятков деталей разных формы и размеров. Как известно, электрическое поле в гальванической ванне имеет сложную структуру, в связи с чем покрытие на поверхности деталей будет иметь различную толщину в разных точках. Если покрытие в некоторых местах поверхности будет меньше значения δ_{min}, определяемого техническим заданием, деталь отбраковывается. В ряде случаев превышение толщины покрытия максимального значения δ_{max} также недопустимо, так как приведет к невозможности сочленения деталей на этапе сборки. Повысить равномерность наносимого гальванического покрытия можно, меняя расположение деталей на подвесочном устройстве (в случае, когда детали имеют различные форму и размеры).

Постановка задачи

С точки зрения системного анализа, входными координатами гальванической системы являются количество, форма и размеры деталей, поступивших на обработку. В качестве управляющего воздействия выберем расположения деталей-катодов на подвеске.

Суммарная неравномерность m штук деталей может быть оценена формулой, аналогичной приведенной в [5 – 7]:

$$R = \sum_{j=1}^{m} \int_{Sj} \frac{\delta_j(x, y, z) - \delta_j^{\min}}{\delta_j^{\min}} dS_j,$$

где R – критерий неравномерности; $\delta_j(x, y, z)$ – толщина покрытия в точке j-го катода с координатами (x, y, z); $\delta_j^{\min}$ – минимальная толщина покрытия на j-м катоде; S_j – площадь поверхности j-го катода.

Задача заключается в поиске такого расположения деталей-катодов на подвеске, при котором суммарная неравномерность получаемых покрытий минимальна [8]. Расположение деталей задается координатами базовых точек. В качестве базовой выбрана точка пересечения диагоналей параллелограмма, описывающего деталь.

Для связи критерия с варьируемыми переменными предложена математическая модель, включающая следующие уравнения [6, 9 – 13]:

$$\left.\begin{aligned}
&\delta_j(x, y, z) = \frac{Э}{\rho}\int_0^T \eta i_{kj}(x, y, z, \tau)d\tau;\\
&i_{kj}(x, y, z) = \chi \mathrm{grad}\varphi(x, y, z)|Sj;\\
&\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2} = 0;\\
&\partial\varphi/\partial n|S_u = 0;\\
&\varphi + F_1(i_a)|S_a = U;\\
&\varphi + F_2(i_k)|S_j = 0;\\
&j = 1, 2, ..., n,
\end{aligned}\right\} \quad (1)$$

где S_a – площадь поверхности анода, м^2; S_j – площадь поверхности j-ой детали-катода, м^2; Э – электрохимический эквивалент металла покрытия, кг/(А·с); ρ – плотность металла покрытия, кг/м^3; T – время нанесения покрытия, с; η – катодный выход по току; τ – текущее время, с; i_k, i_a – соответственно катодная и анодная плотности тока, А/м^2; χ– электропроводность электролита, 1/Ом; $\varphi(x, y, z)$ – потенциал электрического поля, В; S_u – площадь поверхности электроизолированных стенок гальванической ванны и поверхности электролита на границе электролит – воздух, м^2; n – нормаль к поверхности изолятора; U – напряжение в ванне, В; $F_1(i_a)$, $F_2(i_k)$ – функции анодной и катодной плотности тока, учитывающие поляризацию соответственно на аноде и катоде, В.

Математическая постановка задачи формулируется следующим образом. Пусть задан массив $A[i, j]$, где i – номер строки, j – номер позиции в строке (под строками понимаются перекладины подвеса, под номером позиции – кронштейны для фиксирования деталей), A – номер размещенной на i-й, j-й позициях детали.

Найти значение $A[i, j]$, $i = 1, \ldots, p$, $j = 1, \ldots, h$, при которых $R \to \min$ при связях, определяемых системой уравнений (1).

Покрытие будет считаться качественным, если для всех l точек на поверхности детали, где проводилось измерение толщины покрытия δ_i, выполняется условие

$$\delta_{\min} \le \delta_i \le \delta_{\max}, \quad i = 1, 2, \ldots, l. \quad (2)$$

Решение задачи

Простой способ решения рассматриваемой задачи – использование метода полного перебора, но при большой размерности задачи он приводит к очень длительным расчетам. Существуют и другие способы решения данной задачи, такие как метод ветвей и границ и метод Гомори [14, 15], но только метод полного перебора всегда дает гарантированный оптимальный результат.

Главный недостаток метода полного перебора – необходимость просчитать все возможные варианты размещения обрабатываемых деталей на подвесе. Расчет занимает большое количество времени и приводит к простаиванию производственной линии, а также к перерасходу электроэнергии, необходимой для работы ЭВМ, применяемой для расчетов. Данные факторы несут негативные экономические последствия для производства.

Способы ускорения расчетов

Проблему медленной работы метода полного перебора можно решить, применив распараллеливание расчетов. Предположим, что в компьютере, используемым оператором гальванической линии, установлена современная производительная видеокарта с большим количеством вычислительных блоков. В таком случае можно одновременно проводить расчет нескольких вариантов размещения деталей на подвесе.

В качестве примера приведем видеокарту Nvidia GeForce GTX 1060 6GB, которая имеет 1280 вычислительных блоков (рис. 2). При использовании данной видеокарты можно одновременно просчитать все возможные варианты размещения 35 деталей различных формы и веса на подвесе. Таким образом, можно предположить прирост в скорости вычислений примерно в 30 – 35 раз с учетом погрешности. Если задача имеет бóльшую размерность, прирост в скорости расчетов все равно останется существенным по сравнению с последовательными алгоритмами. Следовательно, можно сделать вывод, что использование распараллеливания расчетов при помощи видеокарты ведет к существенному приросту скорости нахождения правильного расположения деталей-катодов на подвесе. В свою очередь это ведет к удешевлению стоимости применения гальванических процессов и снижает процент отбракованных изделий.

Производительность видеокарт значительно увеличивается с выходом каждого нового поколения. Современные потребительские видеокарты оснащаются еще бóльшим количеством вычислительных блоков. Например, видеокарта Nvidia GeForce RTX 3090 Ti оснащена 10752 вычислительными блоками. Такое количество вычислительных блоков обеспечивает еще больший прирост производительности по сравнению с GeForce GTX 1060.

Спецификации референсной видеокарты GeForce GTX 1060	
Параметр	**Значение**
Частота ядра	1506 (1708) МГц
Количество универсальных процессоров	1280
Количество текстурных блоков	80
Количество блоков блендинга	48
Эффективная частота памяти	8000 (4×2000) МГц
Тип памяти	GDDR5
Шина памяти	192-бит
Объем памяти	6 ГБ
Пропускная способность памяти	192 ГБ/с
Вычислительная производительность (FP32)	около 4 терафлопс
Теоретическая максимальная скорость закраски	72 гигапикселя/с
Теоретическая скорость выборки текстур	121 гигатекселей/с
Шина	PCI Express 3.0
Разъемы	Один разъем Dual Link DVI, один HDMI и три DisplayPort
Типичное энергопотребление	120 Вт
Дополнительное питание	Один 6-контактный разъем
Число слотов, занимаемых в системном корпусе	2

Рис. 2. Технические характеристики Nvidia GeForce GTX 1060 6GB

Стоит отметить, что современные видеокарты от компании Nvidia поддерживают технологию CUDA – программно-аппаратной архитектуры параллельных вычислений, которая позволяет существенно увеличить вычислительную производительность, благодаря использованию графических процессоров фирмы Nvidia. CUDASDK позволяет программистам реализовывать на специальных упрощенных диалектах языков программирования C, C++ и Фортран алгоритмы, выполнимые на графических и тензорных процессорах Nvidia. Архитектура CUDA дает разработчику возможность по своему усмотрению организовывать доступ к набору инструкций графического или тензорного ускорителя и управлять его памятью. Функции, ускоренные при помощи CUDA, можно вызывать из различных языков программирования, в том числе Python.

У технологии CUDA есть множество преимуществ:

– наличие понятной документации от разработчика;

– широкий набор готовых инструментов, включающий профайлер;

– наличие готовых библиотек;

– кроссплатформенность технологии;

– технология CUDA является бесплатной.

Работу технологии CUDA можно описать следующим образом. Графический процессор GPU выступает в роли массивно параллельного сопроцессора к центральному процессору CPU. Программа на CUDA задействует как CPU, так и GPU. При этом обычный (последовательный, то есть непараллельный) код выполняется на CPU, а для массивно-параллельных вычислений соответствующий код выполняется на GPU как набор одновременно выполняющихся нитей (потоков) [16]. Также важно понимать, что между нитями на CPU и нитями на GPU есть принципиальные различия:

– нити на GPU обладают крайне небольшой стоимостью создания, управления и уничтожения (контекст нити минимален, все регистры распределены заранее);

– для эффективной загрузки GPU необходимо использовать много тысяч отдельных нитей, в то время как для CPU обычно достаточно 10 – 20 нитей.

За счет того, что программы в CUDA пишутся фактически на обычном языке C, в котором добавлено небольшое число новых конструкций, программирование с применением технологии CUDA значительно сокращает время на разработку и повышает удобство работы с кодом, чем при использовании традиционного GPGPU (техника использования графического процессора видеокарты, использующая графические программные интерфейсы приложений для доступа к GPU). Также стоит отметить, что при использовании технологии CUDA в распоряжении программиста оказывается существенно больше контроля и возможностей при работе с видеокартой.

Приведем основной алгоритм работы с технологией CUDA [17]:

1) выделяем память на GPU;

2) копируем данные из памяти CPU в выделенную память GPU;

3) осуществляем запуск ядра (или последовательно запускаем несколько ядер);

4) копируем результаты вычислений обратно в память CPU;

5) освобождаем выделенную память GPU.

Все нити выполняются параллельно, и каждая нить может получить информацию о себе через встроенные переменные.

Во время работы программы нити разбиваются на группы по 32 нити, называемыми warp. Только нити в пределах одного warp выполняются физически одновременно. Нити из разных warp могут находиться на разных стадиях выполнения программы. При этом управление warp'ми прозрачно осуществляет сам GPU [18].

Для решения задач CUDA использует очень большое количество параллельно выполняемых нитей, при этом обычно каждой нити соответствует один элемент вычисляемых данных. Применяя возможности технологии CUDA при разработке расчетно-логической интеллектуальной системы оптимального управления процессом нанесения гальванического покрытия с применением множества деталей-катодов различных форм и размеров, можно добиться еще большего прироста скорости вычислений.

Кроме применения высокопроизводительной видеокарты в ЭВМ оператора, существуют и другие способы увеличения скорости расчета оптимального расположения деталей на подвесе. На данный момент популярным способом проведения сложных вычислений являются вычисления в «облаке». Облачные вычисления – это предоставление вычислительных ресурсов по запросу через Интернет. Ресурсами могут быть серверы, системы хранения, сети передачи данных, программное обеспечение, платформенные сервисы. Поставщики облачных услуг распределяют вычислительные ресурсы между разными заказчиками. Каждый из заказчиков получает требуемый пул мощностей или сервисов, которые при необходимости масштабируются.

Применение облачных вычислений – крайне удобный способ наращивания вычислительных мощностей. При реализации крупных проектов и расчете больших массивов данных данный способ крайне актуален, однако для применения в задачах, связанных с гальваническими линиями, возможности облачных вычислений избыточны. Не существует столь больших по объему гальванических ванн, в которых можно было бы обрабатывать сразу несколько тысяч деталей средних и крупных размеров. Таким образом, рассмотренный способ не актуален для специфики данной области.

Создание вычислительного кластера из нескольких компьютеров – еще один способ увеличения скорости вычислений при их распараллеливании. Вычислительный кластер – это набор соединенных между собой компьютеров (серверов), которые работают вместе и могут рассматриваться как единая система. В отличие от грид-вычислений, все узлы компьютерного кластера выполняют одну и ту же задачу и управляются одной системой управления.

Серверы кластера обычно соединяются между собой по быстродействующей локальной сети, причем на каждом из серверов работает собственный экземпляр операционной системы. В большинстве случаев все вычислительные узлы кластера используют одинаковое оборудование и одну и ту же операционную систему. Однако в некоторых инсталляциях, например, с использованием платформы приложений для организации кластеров OSCAR (*англ*. Open Source Cluster Application Resources), могут использоваться различные операционные системы или разное серверное оборудование. Кластеры обычно развертываются для большей производительности и доступности, чем то, что можно получить от одного компьютера, пусть даже очень мощного. Часто такое решение более экономично, чем отдельные компьютеры.

Данный способ распараллеливания вычислений актуален на крупных гальванических линиях, если на производство постоянно поступают большие партии новых видов деталей, расчеты для которых ранее не проводились. Стоит отметить, что в случае с гальваническими линиями можно применять кластер небольшого размера, состоящий из 3 – 5 рабочих станций. Их суммарной производительности будет достаточно, чтобы удовлетворить потребности производства.

Результаты экспериментов

Для подтверждения эффективности распараллеливания вычислений решена задача поиска оптимального размещения 12 различных деталей на подвесочном устройстве ванны никелирования, имеющем четыре перекладины с тремя кронштейнами для закрепления деталей на каждой перекладине (рис. 3).

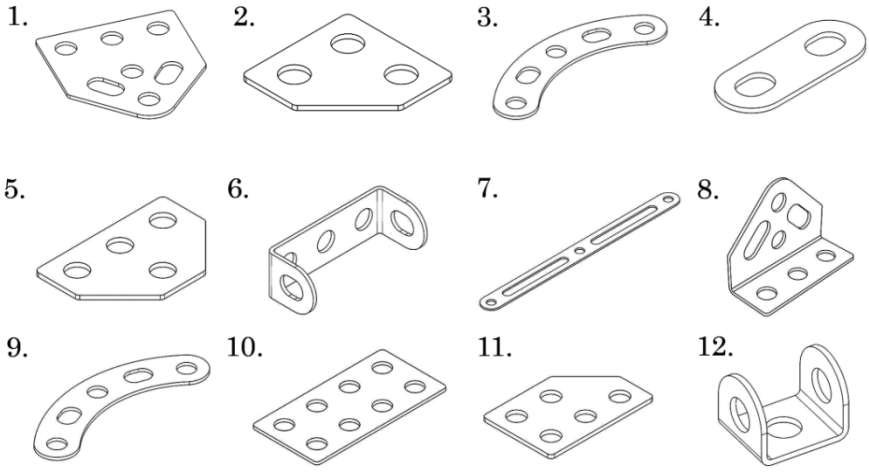


Рис. 3. Детали, на которые необходимо нанести никелевое покрытие

Таблица 1

Оптимальная матрица размещения деталей

	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$
$k = 1$	9	10	7
$k = 2$	11	6	1
$k = 3$	5	8	2
$k = 4$	12	3	4

Процесс никелирования осуществляется в щелочном электролите Уоттса состава, г/л: $NiSO_4 \cdot 7H_2O$ – 300; $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ – 60; H_3BO_3 – 45. Удельная проводимость электролита χ = 17,75 $(Ом \cdot м)^{-1}$, катодный выход по току η = 0,98 = const, электрохимический эквивалент никеля $Э = 3{,}04 \cdot 10^{-7}$ кг/(А·с), плотность никеля ρ = 8900 кг/м^3. Время нанесения покрытия 30 мин.

Расчеты методом полного перебора при последовательных и распараллеленных вычислениях дали одинаковый оптимальный результат (табл. 1).

Для данного размещения критерий R = 0,0833 – всего для одной детали не выполнилось условие (2).

Поиск оптимального решения осуществлялся с использованием процессора IntelCorei3-10100 и видеокарты MSI GeForce GTX 1060 6GB.

Анализ времени, затраченного на поиск оптимального решения, показал, что последовательный расчет методом полного перебора продолжался 5 ч 27 мин; расчет с использованием распараллеливания вычислений при помощи видеокарты с поддержкой технологии CUDA – 32 мин.

Таким образом, можно сделать вывод, что в данном случае применение распараллеливания вычислений ускорило выполнение задачи поиска оптимального размещения 12 различных деталей на подвесочном устройстве ванны никелирования в 10,2 раза.

Заключение

Рассматриваемая задача поиска оптимального расположения деталей-катодов на подвеске при большой размерности требует существенных вычислительных мощностей, поэтому необходимо разрабатывать высокопроизводительные алгоритмы, использующие современные аппаратные технологии, которые могут решать столь сложные задачи за приемлемое время.

Применение технологии распараллеливания расчетов CUDA при помощи видеокарты значительно повышает эффективность работы системы оптимального управления процессом нанесения гальванического покрытия с применением множества деталей-катодов различной формы и размеров [19]. Снижается время расчета, повышается удобство работы оператора гальванической линии. В связи с этим повышается эффективность работы гальванического производства.

Список литературы

1. Кудрявцев, Н. Т. Электролитические покрытия металлами : учеб. пособие / Н. Т. Кудрявцев. – М. : Химия, 1979. – 351 с.
2. Гальванические покрытия в машиностроении : справочник : в 2-х томах / Под ред. М. А. Шлугера. – М. : Машиностроение, 1985. – Т. 1. – 240 с.
3. Мельников, Л. С. Справочник по гальванопокрытиям в машиностроении / Л. С. Мельников. – М. : Машиностроение, 1991. – 384 с.
4. Васильев, А. С. Постановка задачи оптимального нанесения гальванических покрытий на множество деталей / А. С. Васильев, Ю. В. Литовка // Математические методы в технике и технологиях : материалы XVIII Междунар. науч. конф., 31мая – 02 июня 2005 г., Казань. – Казань, 2005. – Т. 10. – С. 101–102.
5. Каданер, Л. И. Равномерность гальванических покрытий / Л. И. Каданер. – Харьков : Харьковский ордена Трудового Красного Знамени гос. университет им. А. М. Горького, 1960. – 414 с.
6. Литовка, Ю. В. Метод расчета потенциалов анодов в многоанодной гальванической ванне / Ю. В. Литовка, И. А. Дьяков // Теоретические основы химической технологии. – 1997. – Т. 31, № 2. – С. 218 – 221.
7. Соловьев, Д. С. Оптимальное управление технологическим процессом нанесения гальванического покрытия в ванне с дополнительными катодами и биполярными электродами / Д. С. Соловьев, В. З. Као, Ю. В. Литовка // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – Т. 17, № 8. – С. 547 – 553. doi: 10.17587/mau.17.547-553
8. Литовка, Ю. В. Оптимизация размещения многокатодной системы с целью минимизации суммарной неравномерности гальванического покрытия / Ю. В. Литовка, А. А. Банников // Современные технологии в задачах управления автоматики и обработки информации : материалы XXVIII Междунар. науч.-техн. конф., 14 – 20 сентября 2019 г., Алушта. – М., 2019. – С. 66–67.
9. Гнусин, Н. П. Основы теории расчета и моделирования электрических полей в электролитах / Н. П. Гнусин, Н. П. Поддубный, А. И. Маслий. – Новосибирск : Наука, 1972. – 276 с.
10. Иванов, В. Т. Численные расчеты электрических полей в электролитах на основе метода квазилинеаризации / В. Т. Иванов // Электрохимия. – 1972. – Т. 8, № 11. – С. 1654 – 1657.
11. Литовка, Ю. В. Моделирование и оптимизация процесса нанесения гальванических покрытий в условиях реверсирования тока / Ю. В. Литовка, А. В. Романенко, А. В. Афанасьев // Теоретические основы химической технологии. – 1998. – Т. 32, № 3. – С. 301 – 304.

12. Литовка, Ю. В. Моделирование и оптимизация импульсных токовых режимов нанесения гальванических покрытий / Ю. В. Литовка, Р. С. Кондрашин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 1999. – Т. 5, № 1. – С. 26 – 33.

13. Литовка, Ю. В. Моделирование и оптимизация гальванической ванны с дополнительными катодами / Ю. В. Литовка, В. З. Као // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 1. – С. 68 – 74. doi: 10.17277/vestnik.2016.01.pp.068-074

14. Высшая математика : учебно-методическое пособие. В 4 ч. Ч. 4. Математическое программирование / Сост. Т. В. Веремеенко ; под ред. Л. Г. Третьяковой. – 2-е изд., испр. – Минск : ГИУСТБГУ, 2010. – 158 с.

15. Набатова, Д. С. Математические и инструментальные методы поддержки принятия / Д. С. Набатова. – М. : Юрайт, 2017. – 292 с.

16. Сандерс, Дж. Технология CUDA в примерах: введение в программирование графических процессов / Дж. Сандерс, Э. Кэндрот ; пер. с англ. А. А. Слинкина. – М. : ДМК Пресс, 2013. – 232 с.

17. Боресков, А. В. Основы работы с технологией CUDA / А. В. Боресков, А. А. Харламов. – М. : ДМК Пресс, 2010. – 232 с.

18. Козлов, С. О. Использование технологии CUDA при разработке приложений для параллельных вычислительных устройств / С. О. Козлов, А. А. Медведев // Вестн. Курганского гос. ун-та. Серия: Естественные науки. – 2015. – № 4 (38). – С. 106 – 112.

19. Литовка, Ю. В. Система управления многокатодной гальванической ванной / Ю. В. Литовка, А. А. Банников // Современные технологии в задачах управления автоматики и обработки информации : материалы XXIX Междунар. науч.-техн. конф., 14 – 20 сентября 2020 г., Алушта. – СПб., 2020. – С. 42.

Solution of the Control Problem of Uneven Plating Using Parallel Processing of Information

A. A. Bannikov[1], Yu. V. Litovka[1], G. V. Shishkina[2]

Departments of Automated Decision Support Systems (1), sapr.tstu@mail.ru; Mechatronics and Technological Measurements (2), TSTU, Tambov, Russia

Keywords: video card; electroplated coatings; detail; unevenness; optimal placement; parallelization; calculation.

Abstract: The problem of finding the optimal arrangement of cathode parts on the suspension, in which the total unevenness of the resulting galvanic coatings is minimal, is considered. Methods for accelerating the calculation of the optimal location with the help of modern technologies used in computers are proposed. The results of experiments confirming the efficiency of parallelization of calculations on a video card using the CUDA technology are presented.

References

1. Kudryavtsev, N.T. *Elektroliticheskiye pokrytiya metallami: uchebnoye posobiye* [Electrolytic coatings with metals: textbook], Moscow: Khimiya, 1979, 351 p. (In Russ.)

2. Shluger M.A. [Ed.] *Gal'vanicheskiye pokrytiya v mashinostroyenii: spravochnik: v 2-kh tomakh* [Galvanic coatings in engineering: a reference book: in 2 volumes], Moscow: Mashinostroyeniye, 1985, vol. 1, 240 p. (In Russ.)

3. Mel'nikov L.S. *Spravochnik po gal'vanopokrytiyam v mashinostroyenii* [Handbook of electroplating in mechanical engineering], Moscow: Mashinostroyeniye, 1991, 384 p. (In Russ.)

4. Vasil'yev A.S., Litovka Yu.V. *Matematicheskiye metody v tekhnike i tekhnologiyakh* [Mathematical methods in engineering and technology], Proceedings of the XVIII International Scientific Conference, 31 May - 02 June, 2005, Kazan, 2005, vol. 10, pp. 101-102. (In Russ.)

5. Kadaner L.I. *Ravnomernost' gal'vanicheskikh pokrytiy* [Uniformity of galvanic coatings], Kharkov: Khar'kovskiy ordena Trudovogo Krasnogo Znameni gosudarstvennyy universitet im. A. M. Gor'kogo, 1960, 414 p. (In Russ.)

6. Litovka Yu.V., D'yakov I.A. [Method for calculating the potentials of anodes in a multi-anode galvanic bath], *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical foundations of chemical technology], 1997, vol. 31, no. 2, pp. 218-221. (In Russ.)

7. Solov'yev D.S., Kao V.Z., Litovka Yu.V. [Optimal control of the electroplating process in a bath with additional cathodes and bipolar electrodes], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye* [Mechatronics, automation, control], 2016, vol. 17, no. 8, pp. 547-553, doi: 10.17587/mau.17.547-553 (In Russ., abstract in Eng.)

8. Litovka Yu.V., Bannikov A.A. *Sovremennyye tekhnologii v zadachakh upravleniya avtomatiki i obrabotki informatsii* [Modern technologies in the problems of control of automation and information processing], Proceedings of the XXVIII International Scientific and Technical conference, 14 - 20 September, 2019, Alushta, Moscow, 2019, pp. 66-67. (In Russ.)

9. Gnusin N.P., Poddubnyy N.P., Masliy A.I. *Osnovy teorii rascheta i modelirovaniya elektricheskikh poley v elektrolitakh* [Fundamentals of the theory of calculation and modeling of electric fields in electrolytes], Novosibirsk: Nauka, 1972, 276 p. (In Russ.)

10. Ivanov V.T. [Numerical calculations of electric fields in electrolytes based on the quasi-linearization method], *Elektrokhimiya* [Electrochemistry], 1972, vol. 8, no. 11, pp. 1654-1657. (In Russ.)

11. Litovka Yu.V., Romanenko A.V., Afanas'yev A.V. [Modeling and optimization of the electroplating process under current reversal conditions], *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical foundations of chemical technology], 1998, vol. 32, no. 3, pp. 301-304. (In Russ., abstract in Eng.)

12. Litovka Yu.V., Kondrashin R.S. [Modeling and optimization of pulsed current modes of electroplating], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 1999, vol. 5, no. 1, pp. 26-33. (In Russ., abstract in Eng.)

13. Litovka Yu.V., Kao V.Z. [Modeling and optimization of a galvanic bath with additional cathodes], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 1, pp. 68-74, doi: 10.17277/vestnik.2016.01.pp.068-074 (In Russ., abstract in Eng.)

14. Veremeyenko T.V. [Comp.], Tret'yakova L.G. [Ed.] *Vysshaya matematika: uchebno-metodicheskoye posobiye. V 4 ch. Ch. 4. Matematicheskoye programmirovaniye* [Higher mathematics: teaching aid. At 4 pm Part 4. Mathematical programming], Minsk: GIUSTBGU, 2010, 158 p. (In Russ.)

15. Nabatova D.S. *Matematicheskiye i instrumental'nyye metody podderzhki prinyatiya* [Mathematical and instrumental methods of acceptance support], Moscow: Yurayt, 2017, 292 p. (In Russ.)

16. Sanders Dzh., Kendrot E. *Tekhnologiya CUDA v primerakh: vvedeniye v programmirovaniye graficheskikh protsessov* [CUDA technology in examples: an introduction to the programming of graphical processes], Moscow: DMK Press, 2013, 232 p. (In Russ.)

17. Boreskov A.V., Kharlamov A.A. *Osnovy raboty s tekhnologiyey CUDA* [Fundamentals of working with CUDA technology], Moscow: DMK Press, 2010, 232 p. (In Russ.)

18. Kozlov S.O., Medvedev A.A. [The use of CUDA technology in the development of applications for parallel computing devices], *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Yestestvennyye nauki* [Bulletin of the Kurgan State University. Series: Natural Sciences], 2015, no. 4 (38), pp. 106-112. (In Russ., abstract in Eng.)

19. Litovka Yu.V., Bannikov A.A. *Sovremennyye tekhnologii v zadachakh upravleniya avtomatiki i obrabotki informatsii* [Modern technologies in the tasks of controlling automation and information processing], Proceedings of the XXIX International Scientific and Technical Conference, 14 - 20 September, 2020, Alushta, St. Petersburg, 2020, p. 42. (In Russ.)

Lösung des Problems der Kontrolle der Ungleichmäßigkeit der galvanischen Abdeckung durch parallele Informationsverarbeitung

Zusammenfassung: Es ist das Problem betrachtet, die optimale Anordnung von Teilkathoden auf der Aufhängung zu finden, bei der die Gesamtunebenheit der resultierenden galvanischen Schichten minimal ist. Die Methoden zur Beschleunigung der Berechnung des optimalen Standorts mit Hilfe moderner Computertechnologien sind vorgeschlagen. Es sind die Ergebnisse von Experimenten vorgestellt, die die Effizienz der Parallelisierung von Berechnungen auf einer Grafikkarte unter Verwendung der CUDA-Technologie bestätigen.

Résolution du problème de la gestion de l'hétérogénéité de la couverture galvanique avec l'utilisation du traitement parallèle de l'information

Résumé: Est examinée la tâche de trouver l'emplacement optimal des pièces-cathodes sur la suspension, dans lequel l'irrégularité totale des revêtements galvaniques obtenus est minime. Sont proposés les moyens d'accélérer les calculs de l'emplacement optimal à l'aide de technologies modernes utilisées dans les ordinateurs. Sont présentés les résultats des expériences qui confirment l'efficacité de la parallélisation des calculs sur la carte vidéo à l'aide de la technologie CUDA.

Авторы: ***Банников Андрей Алексеевич*** **–** аспирант кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений»; ***Литовка Юрий Владимирович*** – доктор технических наук, профессор кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений»; ***Шишкина Галина Викторовна*** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Мехатроника и технологические измерения», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

УДК 004.415.2:004.421
DOI: 10.17277/vestnik.2022.03.pp.376-386

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ КАЧЕСТВОМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СТРУКТУРНОГО ЭЛЕМЕНТА ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

К. А. Алейникова[1], В. Г. Мокрозуб[1], А. П. Рыжков[2], В. Е. Дидрих[2]

Кафедры: «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении» (1), merkushova1412@mail.ru; «Информационные системы и защита информации» (2); ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия

Ключевые слова: качество функционирования; кластеризация; организационно-техническая система; принятие решений; структурный элемент деятельности; теория множеств; управление.

Аннотация: На основе анализа предметной области обосновано применение математического аппарата теории множеств и методов кластеризации при поддержке принятия решений по управлению качеством функционирования структурного элемента деятельности. Предложена структурная модель процесса функционирования структурного элемента деятельности в организационно-технической системе. Получено формальное описание этого процесса, представлен алгоритм группировки структурных элементов деятельности по критерию готовности к выполнению задач по предназначению.

Введение

Современные средства информационного воздействия на структурный элемент деятельности организационно-технической системы (**ОТС**) (видео, аудио и прочие), включая инструментальные и программные средства для создания обучающих программ, тренажеров и других средств освоения ОТС, не всегда отвечают требованию общности и носят явный отпечаток ориентации на определенные предметные области. Скорее всего, это обусловлено двумя основными факторами. Во-первых, отсутствует единая общепризнанная теория создания тренажеров, компьютерных обучающих и им подобных систем. Во-вторых, сама задача подготовки специалистов по применению ОТС в самом широком смысле этого слова настолько сложна, что слабо поддается формализации и автоматизации. Поэтому каждая группа разработчиков, обычно обладающая знаниями в какой-либо определенной предметной области, пытаясь создать нечто универсальное, неизбежно приходит к необходимости сузить функциональные возможности системы и ограничить их решением наиболее проработанных и/или близких им задач. Отчасти это может служить объяснением сложившейся в настоящее время ситуации, когда существующие средства подготовки не находят широкого применения и часто не выходят за рамки круга разработчиков. Нами уточнено понятие модели структурного элемента деятельности, как центральной компоненты, позволяющей обеспечивать управление качеством его функционирования. Ее реализация предполагает наличие структуры данных, содержащей существенные для системы характеристики конкретного структурного элемента деятельности.

Цель исследования – формализация постановки задачи поддержки принятия решений (**ППР)** при управлении качеством структурного элемента деятельности (**СЭД**) на основе использования интеллектуальных методов анализа данных, ориентированных на повышение эффективности управленческих решений в ОТС.

Объект исследования – процесс функционирования СЭД и оценки качества его функционирования. Предметы исследования – модели, методы и алгоритмы в задачах ППР при управлении качеством функционирования структурного элемента деятельности на основе использования в ОТС интеллектуальных технологий.

Уточнение предметной области

Организационно-технической называется такая система, структурными элементами которой являются люди и технические средства/устройства, осуществляющие преобразование ее ресурсов [1]. Как правило, ОТС являются сложными многоуровневыми системами, состоящими из множества взаимодействующих элементов и подсистем. Характерной особенностью ОТС, отличающей ее от систем другого типа, например, технических, является то, что каждый эргатический элемент ОТС принимает решение по организации действий, то есть является решающим элементом. Наиболее остро стоит проблема оценки в области подготовки эргатического элемента ОТС.

В работе [1] представлена модель структурного элемента деятельности, которая полностью отражает процессы функционирования, оценки качества подготовки и формирования информационного воздействия на эргатический элемент ОТС, который в дальнейшем назовем СЭД. Основываясь на данном представлении, построим структурную модель подготовки СЭД к выполнению задач по предназначению, в основе архитектуры которой лежит модель процесса освоения специалистом сложной технической системы, представленная в [2] (рис. 1). Имеется цель, выраженная в терминах текущих характеристик СЭД (оператора ОТС), и пока цель не будет достигнута, повторяется следующая последовательность действий:

– на основании текущего состояния оператора и методики освоения генерируется очередная задача (здесь задача понимается широко как любая информация, требующая ответных действий оператора);

– ответ СЭД сравнивается с эталонным решением и на основании сравнений различий проводится диагностика его ошибок;

– по результатам диагностики корректируются текущие характеристики СЭД.

В структуре модели выделены следующие подсистемы: учебная база знаний (**БЗ**) для данной предметной области (**ПО**); модель СЭД; БЗ о возможных ошибках оператора; БЗ о процессе освоения.

База знаний описывает не только основные понятия и методы решения задач в процессе освоения, но и содержит определения понятий, описания методов, примеры, упражнения и задачи [3].

Модель СЭД содержит информацию о состоянии его знаний, как общие, интегрированные характеристики, так и те, которые отражают усвоение им текущего учебного материала. Первоначально модель СЭД формируется во время предварительного тестирования. В терминах модели СЭД выражается цель освоения ОТС.

База знаний об ошибках оператора (**БЗО**) содержит каталог возможных ошибок и правила выдвижения и проверки гипотез о неправильных представлениях, приведших к данной ошибке. База знаний о процессе освоения содержит общие и частные методики.

Для поддержания «разумного» процесса освоения ОТС инструктор использует специальные знания трех основных типов: о предмете освоения, стратегии и методах освоения, об операторе. К этим специальным типам знаний можно добавить

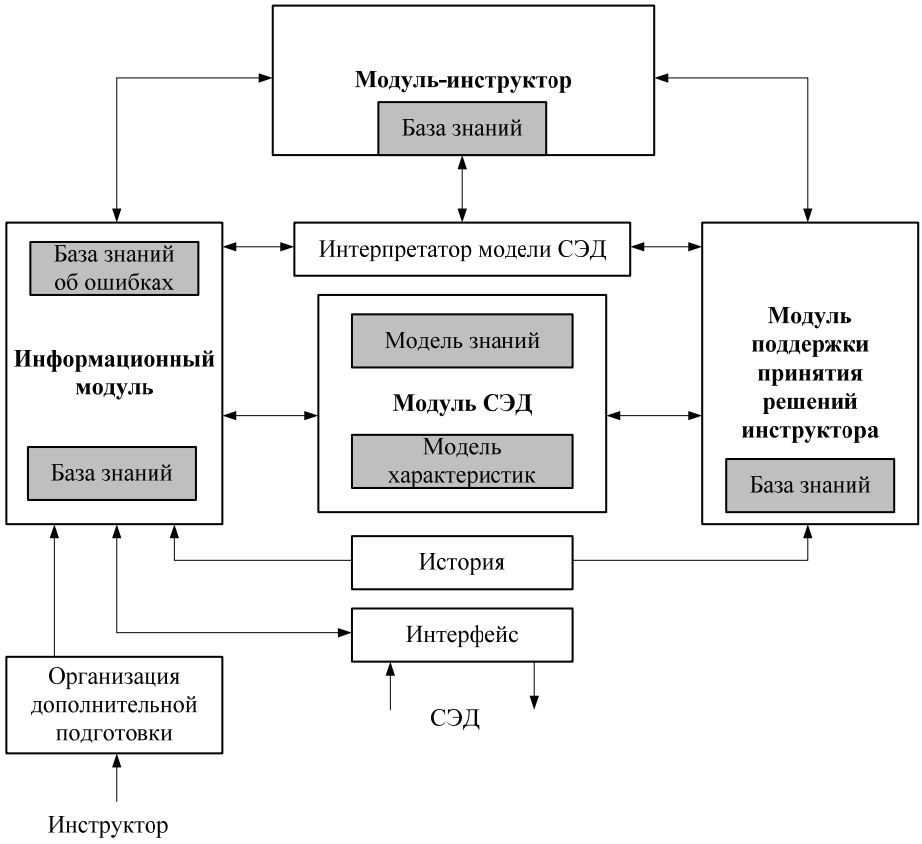


Рис. 1. Структурная модель процесса подготовки СЭД

коммуникативные функции: передачу знаний СЭД, выбор формы и других характеристик сообщений, восприятие его ответов. В традиционных информационных системах освоения (**ИСО**) фрагменты знаний, необходимые для реализации конкретной части программы, были жестко встроены в процедуры выполнения отдельных элементарных шагов [4, 5].

В предложенной системе подготовки необходимые знания явно выделены и представлены, как правило, с помощью методов и технологий инженерии знаний. Используя их, система выполняет различные функции инструктора. Идеальная ИСО должна «уметь» представлять и использовать все перечисленные типы знаний, что позволяет определить ее структуру в виде набора взаимодействующих модулей, в каждом из которых сосредоточены знания одного типа.

Модуль-инструктор содержит фактографические, процедурные и другие знания о предметной области (**ПО**).

Компонента ИОС, представляющая знания системы об операторе, называется моделью оператора, которая постоянно обновляется в ходе освоения в соответствии с изменением отражаемых ею характеристик оператора. В идеальной ИСО такая модель используется всеми модулями системы для адаптации их работы к конкретному оператору.

Информационный модуль представляет знания эксперта-инструктора об организации и поддержке целенаправленного процесса освоения. На основе стратегии освоения ОТС с учетом модели оператора модуль-инструктор обеспечивает управление всем процессом освоения ОТС. Модуль-интерпретатор содержит в себе знания, необходимые для поддержки взаимодействия с оператором.

Модуль оператора – центральный компонент, позволяющий обеспечивать качество управления процессом освоения ОТС. Он включает базу данных, содержащую в каждый момент времени существенные для системы характеристики конкретного оператора.

При этом модель СЭД разделена на две основные компоненты:

– модель личностных характеристик, например, скорость освоения материала, начальные навыки и знания в предметной области, склонность к определенному типу освоению информации;

– модель знаний о предмете и цели.

Первая отражает достаточно устойчивые личностные (когнитивные) характеристики оператора, вторая – картину знаний и умений конкретного оператора по изучаемому модулю ОТС в данный момент времени. Модель оператора после создания ИСО должна поддерживаться в актуальном состоянии. Основной функцией модуля поддержки модели СЭД является определение текущего состояния знаний оператора на основе его наблюдаемого поведения. В процессе логического вывода для принятия решений по управлению освоением ОТС модуль ППР может использовать не только последние действия оператора, но и полную запись его взаимодействия с системой. При принятии решения об уровне текущего состояния профессионально-важных компетенций конкретного оператора в модуле ППР используется собственная база знаний об операторах.

Кроме того, модуль поддержки может использовать возможности модуля-инструктора ПО для сравнения поведения оператора с поведением эксперта-инструктора в той же ситуации, что обеспечивает эффективную «диагностику» знаний. Текущее состояние знаний и личностные характеристики оператора используются модулем-инструктором для индивидуализации процесса обучения. В некоторых системах модель СЭД имитирует поведение оператора и имеет вид функции, аналогичной функции машины логического вывода в интеллектуальной системе, что позволяет модулю-инструктору предсказывать действия оператора, а модулю поддержки модели СЭД подбирать соответствующую модель оператора.

Модель поддержки принятия решений при управлении качеством функционирования СЭД

По результатам вышепроведенного системного анализа процесса функционирования СЭД в ОТС и анализа структурной модели процесса подготовки СЭД, а также основываясь на модели, представленной в [2], сделан вывод, что процесс подготовки и контроля качества функционирования СЭД в ОТС определяется алгоритмом P целенаправленных действий по преобразованию моделей состояния системы и описывается выражением

$$M_{\text{тек}} \Rightarrow M_{\text{тр}}, \tag{1}$$

где $M_{\text{тек}} = \langle C_{\text{тек}}, AC_{\text{тек}}, I_{\text{тек}} \rangle$ – текущая, то есть имеющаяся в рассматриваемый момент времени информационная модель состояния (качества функционирования) ОТС; $M_{\text{тр}} = \langle C_{\text{тр}}, AC_{\text{тр}}, I_{\text{тр}} \rangle$ – информационная модель требуемого состояния ОТС с атрибутами, характеризующими ее работоспособное состояние; $C_{\text{тек}}$, $C_{\text{тр}}$ – множества сообщений соответственно о текущем и требуемом состояниях системы; $AC_{\text{тек}}$, $AC_{\text{тр}}$ – множества атрибутов типовых сообщений соответственно о текущем и требуемом состояниях системы; $I_{\text{тек}}$, $I_{\text{тр}}$ – множества соответственно текущих и требуемых состояний элементов индикации средств отображения информации.

Алгоритм действий для перевода ОТС из исходного (текущего) состояния в требуемое определяется выражением [2]

$$P = \langle N_{\text{ОТС}}, A_{\text{ОТС}}, O_{\text{ОТС}}, S_{\text{ОТС}} \rangle, \quad (2)$$

где $N_{\text{ОТС}}$, $A_{\text{ОТС}}$, $O_{\text{ОТС}}$, $S_{\text{ОТС}}$ – множества соответственно элементов ОТС, типовых операций при переводе ОТС из исходного (текущего) состояния в требуемое, отношений между элементами системы, состояний ОТС.

Задача ППР, в результате решения которой достигается цель, при формировании информационного воздействия на СЭД описывается выражением [2]

$$Z_{\text{ППР}} = \langle U_{\text{ППР}}, R_{\text{ППР}}, P \rangle, \quad (3)$$

где $R_{\text{ППР}}$ – результат решения задачи $Z_{\text{ППР}}$; $U_{\text{ППР}} = F(R_{\text{ППР}}, P)$.

Результат решения задачи ППР при управлении качеством функционирования СЭД представлен в виде

$$U_{\text{ППР}} = F(R_{\text{ППР}}, P),$$

где $F(\bullet)$ – алгоритм, позволяющий синтезировать оптимальное управление на основе планируемых результатов решения задачи $R_{\text{ППР}}$ и возможных алгоритмов действий P по переводу ОТС из текущего состояния в требуемое.

Выражения (1) – (3) представляют собой математическую модель ППР при управлении качеством функционирования СЭД в ОТС.

Анализ выражений (1) – (3) позволяет сделать вывод о том, что функционирование СЭД в контуре управления ОТС рассматривается как процесс преобразования некоторого исходного состояния системы в состояние, обеспечивающее выполнение функциональных задач с требуемым качеством.

Анализ модели

В соответствии с этим задача Z обеспечения СЭД (человеком-оператором) требуемого качества функционирования ОТС определяется как кортеж

$$Z = \langle P, M_{\text{тек}}, M_{\text{тр}} \rangle. \quad (4)$$

В связи с большим количеством накопленной информации в процессе подготовки СЭД к профессиональной деятельности актуальной становится задача обработки и анализа данных в целях получения новых практически полезных знаний, которые будут доступны интерпретации для принятия рационального решения, в том числе и по управлению качеством функционирования СЭД. Использование данной информации, наряду с информацией о понимании места и формы контроля качества функционирования СЭД, позволяет создавать интеллектуальные системы или средства подготовки (**ИСП**) специалистов по эксплуатации и применению ОТС по назначению, которые позволят не просто научить СЭД и контролировать его компетенции, но и по результатам его деятельности обеспечить формирование информационного воздействия на СЭД или их группы, максимально эффективное, с точки зрения обеспечения качества его функционирования. Раскрывая вышесказанное, в процессе управления качеством функционирования СЭД автоматизируются процедуры ППР о формах и способах контроля, например, определив, какие знания недостаточны или ошибочны, можно вернуть его на соответствующий раздел теории или практики либо дать дополнительные разъяснения или задания. Такая система позволит адаптировать процесс подготовки под особенности каждого конкретного СЭД [6 – 9].

Для облегчения процесса подготовки СЭД к решению задач по предназначению (в некоторых ОТС может насчитываться большое количество СЭД), целесообразна группировка отдельных СЭД по критерию уровня профессионально важных компетенций.

Идея группировки СЭД посредством кластерного анализа используется давно. Например, кластеризация студентов по успеваемости, выполненная на основе определенного числа факторов, позволят выделять группы с различным уровнем знаний по предметной области, провести анализ полученных результатов с выявлением причин, способствующих получению студентом того или иного результата, и определить соответствующее информационное воздействие для повышения качества работы.

Для решения задачи группировки СЭД по уровню профессионально важных компетенций и выделения закономерностей в полученных группах использовались карты Кохонена, в основе которых лежит нейронная сеть с обучением без учителя, позволяющая решать задачи кластеризации, снижения размерности пространства признаков и визуализации многомерных данных.

В процессе обучения сети на ее вход поступают признаки, характеризующие объекты, и сеть настраивается под определенные закономерности, существующие в этих признаках выборки. В начале процедуры обучения случайно выбирается расположение центров кластеров. По завершении обучения карты Кохонена формируют такую топологическую карту, где объекты со схожими признаками представляют собой кластеры. Сравнительный анализ карт Кохонена для входных признаков объектов и полученных кластеров позволяет оценить влияние признаков на кластеризацию с выдачей соответствующих рекомендаций [6].

В данной работе в качестве объектов кластеризации выступают СЭД. В качестве входных признаков – четыре фактора, значения которых можно оценить в ходе изучения дисциплины: средний балл в ходе изучения предметной области, полученный по результатам текущих оценок; количество пропусков в течение семестра; общее количество полученных оценок и оценка, полученная на экзамене.

Требуется разбить такую выборку на четыре типологические группы, характеризующие успеваемость студентов: «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» и «плохо». Таким образом, число формируемых кластеров равно четырем.

Для решения рассматриваемой задачи использовалась аналитическая интерактивная платформа Deductor Studio. Данный программный продукт выбран по ряду причин, а именно:

– консолидация данных в хранилище: быстрый, унифицированный и непротиворечивый источник информации для анализа;

– OLAP-модуль: кросс-таблицы и кросс-диаграммы для многомерного анализа данных;

– самообучающиеся алгоритмы и машинное обучение: деревья решений, нейронные сети, самоорганизующиеся карты, ассоциативные правила;

– специализированные визуализаторы, облегчающие интерпретацию и повышающие доверие к результатам.

При этом использовались карты Кохонена размером 24 на 18 с шестиугольными ячейками.

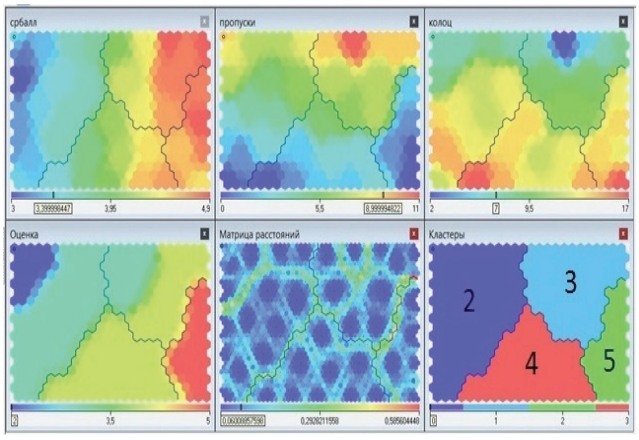
На рисунке 2 представлены исходные данные для кластеризации СЭД по качеству подготовки, загруженные в Deductor Studio; на рис. 3, *а*, изображены карты Кохонена для полученных кластеров и признаков, используемых для кластеризации. На карте кластеров использованы следующие цифровые обозначения групп: 2 (кластер 0) – слабоуспевающая; 3 (кластер 1) – удовлетворительно успевающая; 4 (кластер 3) – хорошо успевающая и 5 (кластер 2) – отлично успевающая.

Таблица

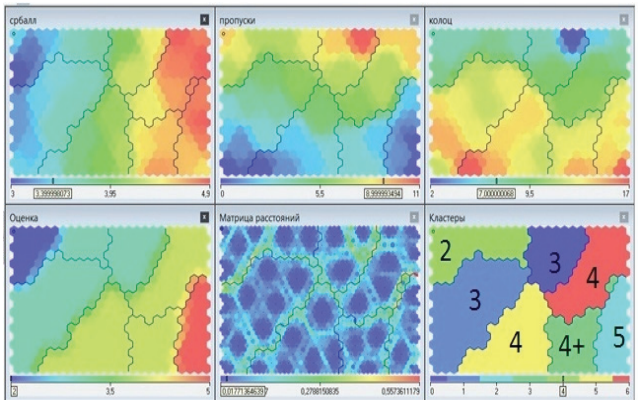
1 / 38

средний балл	количество пропусков	количество оценок	оценка за экзамен
4,4	11	2	3
4,8	0	13	5
3,8	1	15	4
4,4	6	10	4
3,4	0	12	3
4,1	5	14	4
4,8	2	13	5
4,8	9	7	4
3,5	5	12	3
4,7	3	15	3
4,2	3	12	4
4,8	7	9	4
3,4	4	13	3
4,9	9	8	4
3,7	8	7	3
4,6	2	13	4

Рис. 2. Исходные данные для кластеризации



а)



б)

Рис. 3. Карты Кохонена для четырех (*а*) и семи (*б*) кластеров

Визуализатор «Профили кластеров» позволяет определить значимость каждого из используемых признаков на результаты кластеризации (рис. 4). Так, например, для СЭД, попавших в группу «отлично», все исходные признаки имеют приблизительно одинаковую значимость.

Более детальная кластеризация СЭД по уровню профессионально важных качеств получается при делении на большее число кластеров. В работе проведено разбиение выборки с исходными данными на 7 кластеров (рис. 3, *б*).

Полученные результаты проведенного моделирования позволили выявить группы слабо успевающих СЭД по выбранной предметной области, нуждающихся в индивидуальном подходе к освоению материала, и группы СЭД, способных перейти в более высокий кластер. При разбиении на семь кластеров такие группы попадали в отдельные кластеры, занимающие промежуточное положение между указанными выше четырьмя основными кластерами. Это видно из совместного анализа карт Кохонена для четырех и семи кластеров (рис. 5).

Треугольником выделены группы СЭД, которые потенциально способны осваивать профессионально важные качества в большем объеме в сравнении с имеющимся результатом (учиться значительно лучше имеющегося результата), а квадратом – группа студентов, требующая пристального индивидуального внимания.

Рис. 4. Профили кластеров

Рис. 5. Сравнительный анализ карт Кохонена для четырех и семи кластеров

Использование полученной модели позволяет проводить аналогичную кластеризацию СЭД для проверки качества функционирования в любых предметных областях и для любого вида деятельности. Для этого необходимо иметь к этому моменту времени фактические результаты работы СЭД по выбранной предметной области. Полученные результаты кластеризации позволяют судить о качестве процесса освоения ОТС и формировать решения по способам управления ими.

Заключение

В настоящее время интерактивные технологии стали активно применяться в ИСП для подготовки СЭД ОТС. В информационном обществе без овладения интеллектуальными технологиями и умения использовать компьютерные средства для решения определенных задач немыслима реализация потенциала СЭД в современной науке, работе и иных сферах жизни. Целью внедрения интеллектуальных технологий является усиление интеллектуальных возможностей СЭД в информационном обществе, а также индивидуализация, интенсификация процесса освоения ОТС и возможность контроля получаемых профессионально-важных качеств. Использование данных технологий позволяет повысить эффективность управления качеством подготовки СЭД. Например, в течение длительного периода в информационных системах учебных заведений накапливается информация о различных аспектах образовательного процесса: о студентах и их успеваемости, преподавателях и их научно-образовательной работе. Анализ такой информации, поступающей от всех участников образовательного процесса на его различных этапах, будет способствовать повышению эффективности управления качеством подготовки СЭД в сфере образования.

Список литературы

1. Белов, М. В. Модели технологий / М. В. Белов, Д. А. Новиков. – М. : Ленанд, 2019. – 160 с.

2. Моделирование информационного воздействия на эргатический элемент в эрготехнических системах / В. В. Алексеев, С. И. Корыстин, В. А. Малышев, В. В. Сысоев. – М. : СТЕНСВИЛ, 2003. – 163 с.

3. Меркушова, К. А. Интеллектуальный анализ данных в задаче определения итоговой оценки по результатам текущего контроля / К. А. Меркушова, А. П. Рыжков // Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации : материалы XXVII Междунар. науч.-техн. конф., 14 – 20 сентября 2018 г., Алушта. – Тамбов, 2018. – С. 116–117.

4. Рыжков, А. П. Кластеризация студентов по успеваемости с применением карт Кохонена / А. П. Рыжков, К. А. Меркушова // Нейрокомпьютеры и их применение : материалы XIX Всероссийской науч. конф., 30 марта 2021 г., Москва. – М., 2021. – С. 158 – 160.

5. Меркушова, К. А. Анализ возможностей применения алгоритмов Data Mining для оценки знаний студентов / К. А. Меркушова, А. П. Рыжков // Интеллектуальные информационные системы : материалы Междунар. науч.-практ. конф., 2 – 4 декабря 2020 г., Воронеж. – Воронеж, 2021. – С. 49 – 52.

6. Математическая модель управления качеством информационного процесса в эрготехнических системах / А. Н. Талах, В. В. Алексеев, А. О. Жуков [и др.] // Инженерная физика. – 2018. – № 2. – С. 25 – 30.

7. Емельянов, Е. В. Современное состояние и перспективы развития автоматизированных средств управления состоянием сложных технических систем / Е. В. Емельянов, А. А. Стрельцов // Концепция развития и применения РТК военного назначения в интересах РВСН / Под общ. ред. Р. О. Ногина. – Балашиха : ВА РВСН им. Петра Великого, 2018. – С. 14 – 25.

8. Зайцев, А. В. Методология повышения качества эргатического элемента в эрготехнических системах на основе искусственного интеллекта / А. В. Зайцев, П. С. Лысункин // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 3 (23). – С. 17 – 22. doi: 10.21685/2307-4205-2018-3-3

9. Шишкин, А. А. Информационная система подготовки операторов нейрокомпьютеров с использованием компетентностного подхода / А. А. Шишкин, В. В. Алексеев // Нейрокомпьютеры и их применение : материалы XVII Всероссийской науч. конф., 19 марта 2019 г., Москва. – М., 2019. – С. 72 – 74.

Formalization of Decision Support in Quality Management of the Structural Element Functioning in the Organizational-Technical System

K. A. Aleinikova[1], V. G. Mokrozub[1], A. P. Ryzhkov[2], V. E. Diedrich[2]

Departments of Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering (1), merkushova1412@mail.ru;
Information Systems and Information Security (2); TSTU, Tambov, Russia

Keywords: quality of functioning; clustering; organizational and technical system; making decisions; structural element of activity; set theory; control.

Abstract: Based on the analysis of the subject area, the application of the mathematical apparatus of the theory of sets and clustering methods is substantiated with the support of decision-making on quality management of a structural element functioning. A structural model of the process of the structural element functioning in the organizational-technical system is proposed. A formal description of this process is obtained; an algorithm for grouping the structural elements of activity according to the criterion of readiness to perform tasks for the intended purpose is presented.

References

1. Belov M.V., Novikov D.A. *Modeli tekhnologiy* [Models of technologies], Moscow: Lenand, 2019, 160 p. (In Russ.)

2. Alekseyev V.V., Korystin S.I., Malyshev V.A., Sysoyev V.V. *Modelirovaniye informatsionnogo vozdeystviya na ergaticheskiy element v ergotekhnicheskikh sistemakh* [Modeling of information impact on the ergatic element in ergotechnical systems], Moscow: STENSVIL, 2003, 163 p. (In Russ.)

3. Merkushova K.A., Ryzhkov A.P. *Sovremennyye tekhnologii v zadachakh upravleniya, avtomatiki i obrabotki informatsii* [Modern technologies in control, automation and information processing], Proceedings of the XXVII International Scientific and technical conference, 14 - 20 September, 2018, Alushta, Tambov, 2018, pp. 116-117. (In Russ.)

4. Ryzhkov A.P., Merkushova K.A. *Neyrokomp'yutery i ikh primeneniye* [Neurocomputers and their application], Proceedings of the XIX All-Russian Scientific Conference, 30 March, 2021, Moscow, 2021, pp. 158-160. (In Russ.)

5. Merkushova K.A., Ryzhkov A.P. *Intellektual'nyye informatsionnyye sistemy* [Intelligent information systems], Proceedings of the International scientific and practical conference, 2 - 4 December, 2020, Voronezh, 2021, pp. 49-52. (In Russ.)

6. Talakh A.N., Alekseyev V.V., Zhukov A.O., Kulakov A.V., Tyutyunnik V.M. [Mathematical model of information process quality management in ergotechnical systems], *Inzhenernaya fizika* [Engineering physics], 2018, no. 2, pp. 25-30. (In Russ., abstract in Eng.)

7. Yemel'yanov Ye.V., Strel'tsov A.A., Nogin R.O. [Ed.] *Kontseptsiya razvitiya i primeneniya RTK voyennogo naznacheniya v interesakh RVSN* [The concept of development and use of military RTK in the interests of the Strategic Missile Forces], Balashikha: VA RVSN im. Petra Velikogo, 2018, pp. 14-25. (In Russ.)

8. Zaytsev A.V., Lysunkin P.S. [Methodology for improving the quality of an ergatic element in ergotechnical systems based on artificial intelligence], *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems], 2018, no. 3 (23), pp. 17-22, doi: 10.21685/2307-4205-2018-3-3 (In Russ., abstract in Eng.)

9. Shishkin A.A., Alekseyev V.V. *Neyrokomp'yutery i ikh primeneniye* [Neurocomputers and their application], Proceedings of the XVII All-Russian Scientific Conference, 19 March, 2019, Moscow, 2019, pp. 72-74. (In Russ.)

Formalisierung des Problems der Entscheidungsunterstützung beim Qualitätsmanagement des funktionierenden Strukturelements der Aktivität im organisatorischen und technischen System

Zusammenfassung: Ausgehend von der Analyse des Fachgebietes ist die Anwendung des mathematischen Apparates der Mengenlehre und der Clustering-Methoden mit Hilfe der Entscheidungsunterstützung zum Management der Qualität des Funktionierens des Strukturelementes der Tätigkeit begründet. Es ist ein Strukturmodell des Funktionierens des Strukturelements der Aktivität im organisatorischen und technischen System vorgeschlagen. Eine formale Beschreibung dieses Prozesses ist erhalten, ein Algorithmus zur Gruppierung der Strukturelemente der Aktivität nach dem Kriterium der Bereitschaft zur Erfüllung von Aufgaben für den beabsichtigten Zweck ist vorgestellt.

Formalisation de la tâche d'appui à la décision lors de la gestion de la qualité du fonctionnement de l'élément structurel de l'activité dans le système organisationnel et technique

Résumé: A la base de l'analyse du domaine, est justifiée l'application de l'appareil mathématique de la théorie des ensembles et des méthodes de clustering avec l'appui de la prise de décision sur la gestion de la qualité du fonctionnement de l'élément structurel de l'activité. Est proposé un modèle structurel du processus du fonctionnement de l'élément structurel de l'activité dans le système organisationnel et technique. Est proposée une description formelle de ce processus. Est présenté un algorithme pour regrouper les éléments structurels de l'activité selon le critère de la disponibilité de l'exécution des taches ciblées.

Авторы: ***Алейникова Кристина Андреевна*** – аспирант кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; ***Мокрозуб Владимир Григорьевич*** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; ***Рыжков Алексей Петрович*** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные системы и защита информации»; ***Дидрих Валерий Евгеньевич*** – доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные системы и защита информации», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

УДК 681.51
DOI: 10.17277/vestnik.2022.03.pp.387-397

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТРЕНАЖЕРА НА ОСНОВЕ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СРЕДСТВАМИ ИМИТАЦИИ

А. А. Сиухин, С. В. Карпушкин

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

Ключевые слова: машинное зрение; прогнозирование; система адаптивного управления; тренажерный комплекс.

Аннотация: Предложена схема тренажера с наблюдателями и показана его информационная модель. Поставлена задача структурно-параметрического синтеза системы управления тренажером. Представлен фильтр поиска уникальных состояний пользователя. Дано описание принципа поиска и формирования стратегии динамики пользователя. Представлен анализ результатов исследования и область их применения.

Введение

Высокие требования точности и скорости современных технологических систем требуют использования специализированного программного обеспечения, способного поддерживать высокую скорость реакции и точность выполнения поставленных задач в течение всего периода функционирования систем адаптивного управления (**САУ**), которые способны в режиме реального времени осуществлять:

– сбор и анализ показаний о состоянии объекта управления;

– управление подконтрольным объектом согласно заранее сформированной стратегии управления;

– адаптацию управляющего воздействия к действиям внешних сил.

Системы адаптивного управления реализуют алгоритмы, предназначенные для достижения заданных целей согласно моделям управления. Объектом управления могут быть как технические объекты, так и люди [1, 2].

Системы адаптивного управления активно применяются для адаптации систем к действиям человека-пользователя. Одним из направлений развития подобных САУ является применение в средствах имитации нагрузок беговых тренажеров, в которых скорость бегового полотна должна адаптироваться к скорости тренируемого в режиме реального времени. Отличительными особенностями САУ беговых тренажеров являются:

– различные методы получения данных о динамике пользователя. Многие системы ограничивают подвижность пользователей при сборе данных, используя проводные датчики контроля или специальные костюмы;

– отсутствие предварительной информации о динамике пользователя. Динамика разных пользователей часто не одинакова даже при выполнении одних и тех же действий, что препятствует ее формализации;

– использование динамики пользователя в качестве управляющего воздействия на беговое полотно. Управляющее воздействие определяется на основе анализа движений пользователя, которые в свою очередь является реакцией на действия тренажера;

– непосредственное влияние изменений скорости бегового полотна на состояние пользователя. Скорость бегового полотна адаптируется к динамике пользователя, а сам пользователь одновременно приспосабливается к изменению скорости бегового полотна. При адаптации пользователя динамика его движения изменяется, на что также реагирует САУ;

– запаздывание реакции пользователя на изменение скорости бегового полотна. Тренажер – инерционная система, поэтому изменение скорости бегового полотна не может быть реализовано моментально.

Запаздывание – время, затрачиваемое САУ тренажера (**САУт**) на сбор и анализ данных пользователя, расчет управляющего воздействия и приведение скорости бегового полотна тренажера в соответствие реальной динамике пользователя. Минимальное запаздывание существующих беговых тренажеров, напрямую адаптирующих скорость бегового полотна к скорости пользователя, составляет 0,5 с. Они реагируют на минимальные изменения положения пользователя, их САУ не учитывают инерцию (существует эффект маятника в процессе приведения скорости движения полотна тренажера в соответствие скорости пользователя). В тренажерах, адаптирующих скорость бегового полотна к скорости пользователя с учетом инерции, запаздывание вдвое больше. Данные тренажеры плавно реагируют на изменения положения пользователя, САУ учитывает его инерцию (нет эффекта маятника), плавность изменения скорости бегового полотна препятствует своевременной остановке [3 – 7].

Принцип функционирования САУ тренажера

В качестве метода получения данных о динамике пользователя в САУт используется два подхода: установка датчиков на теле пользователя и установка датчиков контроля (наблюдателей) на тренажере. В первом случае на пользователя надевается специальный костюм или датчики положения. Использование проводного оборудования ограничивает свободу перемещения пользователя, а аккумуляторного – продолжительность тренировки [8]. Во втором случае, наблюдатели монтируются на тренажер и не ограничивают свободу движения пользователя.

Наибольшее распространение получили наблюдатели двух типов: на основе ультразвуковых датчиков и видео- фотокамер.

Ультразвуковые датчики позволяют контролировать положение тренируемого путем поиска отраженной от него звуковой волны, поэтому имеют недостатки: материал одежды пользователя должен хорошо отражать звуковые волны; ультразвуковой датчик не должен получать волны от других датчиков; датчики восприимчивы к электромагнитному полю, отражающая поверхность должна находиться в области чувствительности датчика (обычно 0,3…1,5 м) [9, 10].

Более перспективным является использование в качестве наблюдателей видео-фотокамер. Камеры получают изображение пользователя с различных сторон и не восприимчивы к сторонним влияниям, не препятствуют свободе движения пользователя, поле зрения камер значительно шире, чем области чувствительности ультразвуковых датчиков (обычно 0,1…3 м) [5, 11].

На рисунке 1 представлена схема тренажера с двумя наблюдателями, такое расположение позволяет контролировать динамику пользователя по всей плоскости бегового полотна. На основе этого рисунка составлена схема информационных потоков САУ системы имитации нагрузок бегового тренажера (рис. 2).

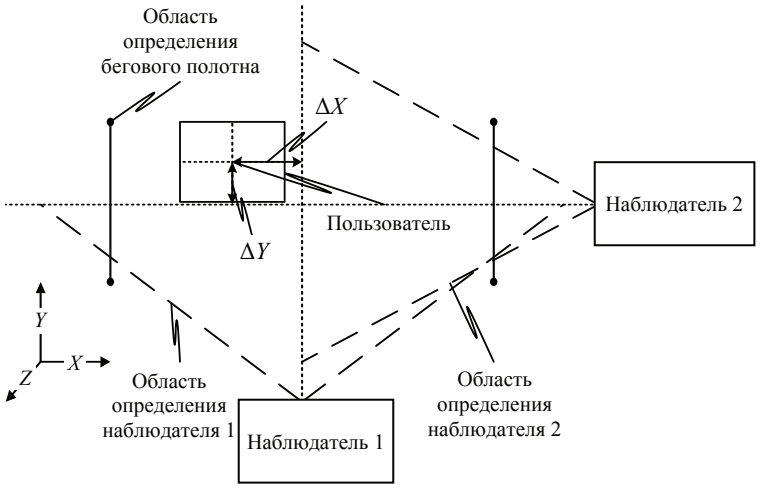


Рис. 1. Схема бегового тренажера с двумя наблюдателями

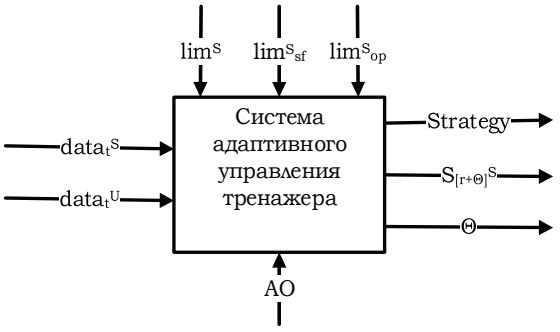


Рис. 2. Схема информационных потоков системы адаптивного управления системы имитации нагрузок

На основе рис. 2 сформировано математическое описание САУт:

$$\begin{aligned} &ACS^s = \{data_t, Limits\} \to Outputs_t \\ &data_t = \{data_t^s, data_t^u\} \\ &Limits = \{lim^s, lim_{sf}^s, lim_{op}^s\} \\ &Outputs_t = \{Strategy, s_{[t+\Theta]}^s, \Theta\} \end{aligned}, \qquad (1)$$

где ACS^s – модель, позволяющая прогнозировать значения выходных параметров $Outputs_t$; t – временная метка; $data_t$ – множество возможных входных состояний САУт; $data_t^u$ – данные о состоянии пользователя, в виде изображений, получаемых с наблюдателей; $data_t^s$ – данные о состоянии тренажера, в виде массива, получаемые от датчиков тренажера; $Limits$ – множество ограничений на свободу действий системы, неизменное в процессе тренировки, задаются для аппаратного обеспечения тренажера; lim^s –возможности тренажера; lim_{sf}^s – требования техни-

ки безопасности; lim^{s}_{op} – ограничения, заданные оператором; $Outputs_t$ – множество результатов работы САУт; *Strategy – библиотека стратегий* – база данных, содержащая последовательность *состояний пользователя* (изменение его положения между кадрами, полученными от наблюдателя, в виде набора пикселей – *контрольных точек пользователя*) и соответствующих состояний тренажера (параметры аппаратного обеспечения, например, скорость бегового полотна, частота вращения вала двигателя и т.п.); $s^{s}_{[t+\Theta]}$ – стратегия, отражающая спрогнозированную динамику тренажера, согласно ей осуществляется управление тренажером; Θ –запаздывание тренажера.

Постановка задачи исследования

На основе перечисленных отличительных особенностей САУт, схемы ее информационных потоков (см. рис. 2) и математического описания (1) сформулирована задача исследования: сформировать конечную библиотеку стратегий взаимодействия организационно-технической системы «тренируемый – тренажер – оператор»

$$Strategy = \{s_{k1,T}, s_{k2,T}, ..., s_{ki,T}\}, \tag{2}$$

обеспечивающую максимальную эффективность функционирования САУ с точки зрения объема используемых данных K_{Data} и их точности K_{Δ}:

$$K_{Data} = \frac{\Delta data^{u}_{ki,r}}{data^{u}_{ki,r}} 100\ \%; \tag{3}$$

$$K_{\Delta} = \frac{\Delta data^{u}_{k,t}}{\Delta data^{u}_{k,t}*} 100\ \%; \tag{4}$$

$$\Delta data^{u}_{k,t1} = data^{u}_{k,t-1} - data^{u}_{k,t}, \tag{5}$$

где $\Delta data^{u}_{k,t}*$, $\Delta data^{u}_{k,t}$ – k-е состояние пользователя в момент времени t соответственно до и после фильтрации.

Каждый элемент библиотеки $s_{ki,T} \in Strategy$ является стратегией поведения организационно-технической системы на определенном промежутке времени T. Каждая стратегия включает набор состояний пользователя $s^{u}_{ki,T}$ и тренажера $s^{s}_{ki,T}$, распределенных во времени, каждая стратегия состоит из состояний:

$$\begin{aligned} s_{ki,T} &= \{s^{u}_{ki,T}, s^{s}_{ki,T}\} \\ s^{u}_{k,T} &= \{\Delta data^{u}_{k1,t1}, \Delta data^{u}_{k2,t2}, ..., \Delta data^{u}_{ki,ti}\} \\ s^{s}_{ki,T} &= \{\Delta data^{s}_{k1,t1}, \Delta data^{s}_{k2,t2}, ..., \Delta data^{s}_{ki,ti}\} \end{aligned} . \tag{6}$$

Библиотека стратегий *Strategy* должна позволять модели ACS^{s} сократить период программно-аппаратного запаздывания Θ до требуемого значения путем приведения аппаратного обеспечения тренажера в состояние, определенное на основе стратегии. При этом библиотека *Strategy* должна обеспечивать выполнение условий:

$$\begin{cases} \forall \Delta data_{k,ti}^{u} \in s_{k,T}^{u} \\ T \geq \Theta \\ FPS \geq 10 \end{cases}, \tag{7}$$

где T – продолжительность реализации выбранной стратегии; FPS – количество кадров с наблюдателя в секунду.

Получение состояний пользователя

Наблюдатель передает в систему кадр разрешением 640×480, каждый пиксель которого имеет 3 параметра, характеризующих цвет [B, G, R]. Полученные одновременно кадры объединяются (рис. 3, *а*).

Результирующее изображение имеет разрешение 1280×480. Объем обрабатываемых данных

$$data_{k,t}^{u} = 1280 \cdot 480 \cdot 3 = 1\,843\,200\,. \tag{8}$$

Полученное изображение из цветной палитры [B, G, R] переводится в менее объемную черно-белую (рис. 3, *б*).

За счет перехода к черно-белой палитре, цвет каждого пикселя характеризуется одним параметром. Объем обрабатываемых данных

$$data_{k,t}^{u*} = 1280 \cdot 480 = 614\,400\,. \tag{9}$$

Согласно формуле (5), получим состояния пользователя, которые позволяют оценивать не общее количество пикселей, а отклонение координат текущего состояния от предыдущего. Это позволяет значительно снизить количество используемой при анализе информации.

В результате $\Delta data_{k,t}^{u} = 4\,256$ пикселей, то есть

$$K_{Data} = \frac{4256}{1\,843\,200} \cdot 100\,\% = 0{,}2309\,\%. \tag{10}$$

Использование отклонений координат для фиксирования состояний пользователя позволило уменьшить объем обрабатываемых данных до 0,2309 % от входного $\Delta data_{k,t}^{u}$, при этом $FPS \approx 55$.

а)

б)

Рис. 3. Входные объединенный [B, G, R] (*а*) и черно-белый (*б*) кадры наблюдателя

Фильтрация состояний пользователя

В стратегии предпочтительно хранить ссылки (ключи), а не полные наборы данных о состояниях пользователя, что позволит представить стратегию в виде одномерного массива ключей. Значение каждой ссылки содержит все координаты пикселей состояний. В качестве ключа используется порядковый номер состояний.

На рисунке 4 показано количество уникальных состояний. Входных (Вх.) состояний получено 3600 (100 %), из них уникальных (Ун.) 3207 (89,08 %). Для уменьшения объема хранимых данных ключи присваиваются только уникальным параметрам динамики состояний пользователя. При анализе изображений необходимо учитывать дополнительные погрешности, которые возникают в аппаратной части, такие как распределение света на изображении, помехи, искажения линз, поэтому некоторые аналогичные состояния распознаются как различные. Следовательно, для формирования стратегии, динамика которой отличается от входной на K_{Δ} = 4,7 %, достаточно присвоить ключи 144 состояниям или 4 % от объема входного кадра.

Заметим, что хранение и использование в стратегии некоторых из отобранных состояний, классифицированных как уникальные, не требуется, так как они или крайне редки, или ошибочно распознаны (являются погрешностями). На рисунке 5 представлен результат фильтрации: 144 входных (Вх.) состояний и их коррекция с применением 59 фильтрованных (Ф.) состояний: всем значениям Вх. состояний, которые меньше Ф., присваиваются крайние значения Ф. состояний. Промежуточные значения Вх. состояний остаются неизменными и формируют выходные (Вых.) состояния для стратегии.

	Точность данных KΔ	Ун. состояния	Ун. состояния, %	Комментарии:
0	Нет	3600	100.00%	Вх. состояния
1	0.000%	3207	89.08%	Ун. состояния
2	0.235%	1766	49.06%	Ун. состояния с разницей > 10
3	2.350%	283	7.86%	Ун. состояния с разницей > 100
4	4.700%	144	4.00%	Ун. состояния с разницей > 200

Рис. 4. Количество уникальных состояний

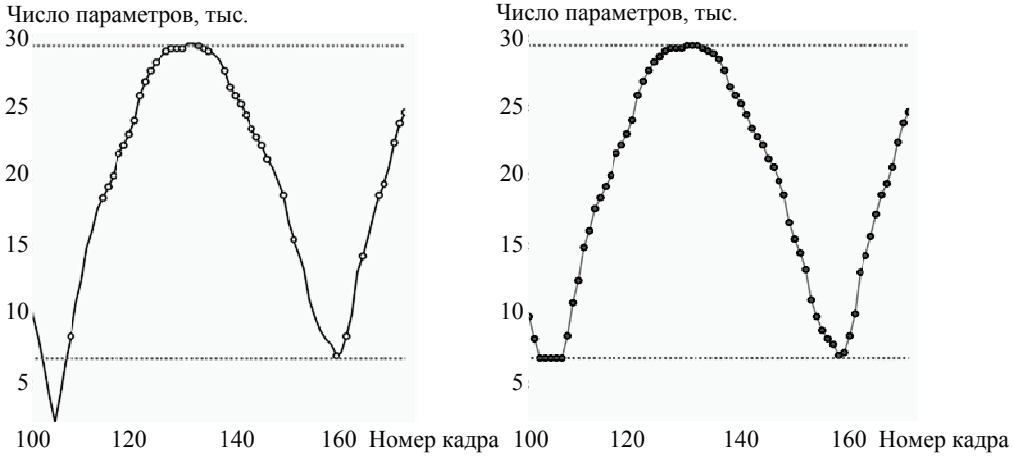


Рис. 5. Фильтрация уникальных состояний:

– Вх. [Вс.: 3600, Ун.: 144]; ○ – Ф. [Вс.: 2440, Ун.: 59]; ● – Вых. [Вс.: 3600, Ун.: 114]

В качестве фильтрованных состояний выбраны те, которые встречаются более 0,8 % раз на всем объеме. Пунктирные линии проведены через максимальное и минимальное значение Ф. состояний.

Алгоритм поиска продолжительности стратегии. Алгоритм использует выходные состояния для поиска стратегии динамики пользователя $s_{ki,T}$: на всем объеме выходных состояний осуществляется поиск последовательностей, пересекающих пунктирные оси. Результат приведен на рис. 6.

На всем объеме данных (3600 состояний) найдено 26 последовательностей длиной 100 состояний. Переход из одного состояния в другое осуществляются в определенном порядке, что позволило создать траекторию, аналогичную цепи Маркова. Согласно алгоритму, стратегия имеет длину $s_{ki,T\,=\,100}$ (количество ключей) и вероятность реализации 76,47 %.

Алгоритм поиска стратегии динамики пользователя. Для поиска состояний, наиболее приближенных к реальным входным состояниям, нанесем все 26 на один участок и найдем среднее значение в каждый момент времени (рис. 7).

В результате, для формирования стратегии $s_{k,\,T\,=\,100}$ достаточно хранить 80 Ун. состояний $\left\{s^{u}_{k,T}, s^{s}_{k,T}\right\}$, из которых формируется стратегия длиной 100 кадров или $s_{ki,\,T\,=\,100}$ = 3,33 с (при FPS = 30 кадров/с).

Анализ результатов исследования. Система адаптивного управления тренажера использует стратегию, если динамика последовательных 5 % входных состояний соответствует данным, хранящимся в стратегии, с точностью K_{Δ} = 4,7 % (рис. 8). Стратегия определяется за 0,167 с (при FPS = 30 кадров/с – стандартная частота кадров наблюдателей, прогнозирует на $s_{ki,T\,=\,100}$ = 3,33 – 0,167 = 3,163 с (или 95 кадров) вперед, что соответствует охвату 89,69 % полученных входных состояний.

	Кадров стратегии	Совпадений	Совпадений, %
0	100	26	76.470588
1	101	5	14.705882
2	99	2	5.882353
3	102	1	2.941176

Рис. 6. Результат алгоритма поиска длины стратегии

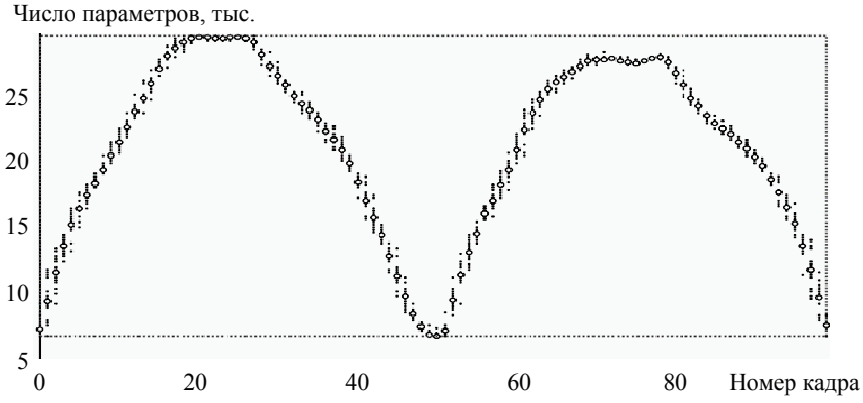


Рис. 7. Формирование стратегии:
▪ – траектория № 1 – 26; ○ – стратегия

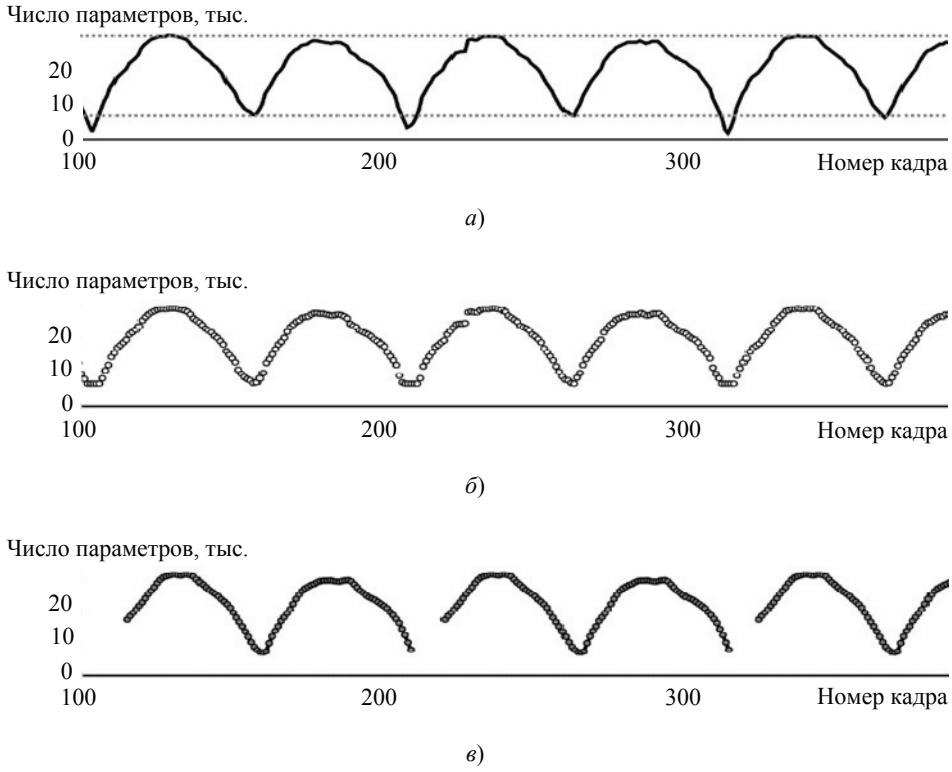


Рис. 8. Результат работы алгоритма поиска стратегии:
а – входной; *б* – выходной; *в* – стратегия

Таким образом, представленный алгоритм можно использовать для компенсации запаздывания системы управления $\Theta \leq 3{,}163$ с. В качестве управляющего воздействия САУт модель ACS^s использует параметры стратегии $s_{ki,T}$, которые опережают реальные входные данные на время запаздывания Θ.

Параметры аппаратного обеспечения в стратегии получены на основании исторических данных, это позволяет не рассчитывать их в реальном времени. Хранение параметров пользователя и аппаратного обеспечения позволяет использовать исторические данные для решения задачи управления тренажером с компенсацией запаздывания.

Выводы и результаты исследования

Впервые предложена математическая постановка задачи структурно-параметрического синтеза системы адаптивного управления тренажером, решение которой позволило компенсировать запаздывание системы управления.

Разработано и апробировано специальное математическое и алгоритмическое обеспечение для обработки информации о динамике структурных элементов тренажера, позволяющее определять закономерности функционирования тренажера и динамики состояний тела тренируемого. Представлена методика формирования библиотеки стратегий, позволившая уменьшить объем обрабатываемых данных до 0,2309 % от объема входного кадра наблюдателя. Даны критерии оценки количества и точности обрабатываемых данных, позволяющие оценить качество функционирования представленной системы адаптивного управления.

Разработан алгоритм поиска стратегии динамики пользователя. Стратегия сформирована на основе 26 траекторий динамики пользователя, содержит 100 состояний, что составляет 2,78 % от входного количества (3600 состояний) и охватывает 89,69 % входных состояний с точностью 4,7 % (см. рис. 8).

Представленная модель прогнозирования выходных состояний САУт позволила спрогнозировать динамику пользователя на период 3,163 с за 0,167 с (при ~30 кадрах/с от наблюдателя) с использованием стратегии и исторических данных динамики пользователя.

Область применения разработанных модели и алгоритмов включает физические динамические системы, в которых субъект управления многократно совершает определенные действия (САУ беговых тренажеров).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта: договор № 20-37-90041\20 от 20.08.2020.

Список литературы

1. Astrom, K. J. Adaptive Control / K. J. Astrom, B. Wittenmark. – 2d ed. – Addison-Wesley, 1994. – 574 p.

2. Юревич, Е. И. Теория автоматического управления / Е. И. Юревич. – 3-е изд. – СПб. : БХВ-Петербург, 2007. – 560 с.

3. Iwata, H. Walking About Virtual Environments on an Infinite Floor / H. Iwata // Proceedings IEEE Virtual Reality (Cat. No. 99CB36316). – IEEE, 1999. – P. 286 – 293.

4. Iwata, H. Virtual Perambulator: a Novel Interface Device for Locomotion in Virtual Environment / H. Iwata, T. Fujii // Proceedings of the IEEE 1996 Virtual Reality Annual International Symposium. – IEEE, 1996. – P. 60 – 65.

5. Motion Control of the Cybercarpet Platform / A. De Luca, R. Mattone, P. Robuffo Giordano [et al.] // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2012. – Vol. 21, No. 2. – P. 410 – 427. doi: 10.1109/TCST.2012.2185051

6. An Omnidirectional Platform Design: Application to Posture Analysis / N. Hedjazi, A. Benali, M. Bouzit, Z. Dibi // XIV Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing 2016. – Springer, Cham, 2016. – P. 602 – 607. doi: 10.1007/978-3-319-32703-7_116

7. Schwaiger, M. C. A 2d-motion Platform: The Cybercarpet / M. C. Schwaiger, T. Thummel, H. Ulbrich // Second Joint Euro Haptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (WHC'07). – IEEE, 2007. – P. 415 – 420. doi: 10.1109/WHC.2007.1

8. Yoon, J. A Novel Walking Speed Estimation Scheme and Its Application to Treadmill Control for Gait Rehabilitation / J. Yoon, H. S. Park, D. L. Damiano // Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation. – 2012. – Vol. 9, No. 1. – P. 62. doi: 10.1186/1743-0003-9-62

9. Yoon, J. Impedance Control of a Small Treadmill with Sonar Sensors for Automatic Speed Adaptation / J. Yoon, A. Manurung, G. S. Kim // International Journal of Control, Automation and Systems. – 2014. – Vol. 12, No. 6. – P. 1323 – 1335. doi: 10.1007/s12555-013-0241-3

10. A Feedback-Controlled Treadmill (Treadmill-on-Demand) and the Spontaneous Speed of Walking and Running in Humans / A. E. Minetti, L. Boldrini, L. Brusamolin [et al.] // Journal of Applied Physiology. – 2003. – Vol. 95, No. 2. – P. 838 – 843. doi: 10.1152/japplphysiol.00128.2003

11. Rida, I. Gait Recognition Based on Modified Phase-Only Correlation / I. Rida, S. Almaadeed, A. Bouridane // Signal, Image and Video Processing. – 2016. – Vol. 10, No. 3. – P. 463 – 470. doi: 10.1007/s11760-015-0766-4

Structural-Parametric Synthesis of the Quality Control System for the Simulator Based on Adaptive Control of Simulation Tools

A. A. Siukhin, S. V. Karpushkin

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

Keywords: machine vision; forecasting; adaptive control system; training complex.

Abstract: A scheme of a simulator with observers is proposed and its information model is shown. The task of structural-parametric synthesis of the simulator control system is set. A search filter for unique user states has been introduced. The description of the principle of search and formation of the user dynamics strategy is given. An analysis of the results of the study and the scope of their application are presented.

References

1. Astrom K.J., Wittenmark B. *Adaptive Control*, Addison-Wesley, 1994, 574 p.
2. Yurevich Ye.I. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of automatic control], St. Petersburg: BXB-Peterburg, 2007, 560 p. (In Russ.)
3. Iwata H. Walking About Virtual Environments on an Infinite Floor, *Proceedings IEEE Virtual Reality* (*Cat. No. 99CB36316*), IEEE, 1999, pp. 286-293.
4. Iwata H., Fujii T. Virtual Perambulator: a Novel Interface Device for Locomotion in Virtual Environment, *Proceedings of the IEEE 1996 Virtual Reality Annual International Symposium*, IEEE, 1996, pp. 60-65.
5. De Luca A., Mattone R., Robuffo Giordano P. [et al.] Motion Control of the Cybercarpet Platform, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2012, vol. 21, no. 2, pp. 410-427, doi: 10.1109/TCST.2012.2185051
6. Hedjazi N., Benali A., Bouzit M., Dibi Z. An Omnidirectional Platform Design: Application to Posture Analysis, *XIV Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing 2016*, Springer, Cham, 2016, pp. 602-607, doi: 10.1007/978-3-319-32703-7_116
7. Schwaiger M.C., Thummel T., Ulbrich H. A 2d-motion Platform: The Cybercarpet, *Second Joint Euro Haptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (WHC'07)*, IEEE, 2007, pp. 415-420, doi: 10.1109/WHC.2007.1
8. Yoon J., Park H.S., Damiano D.L. A Novel Walking Speed Estimation Scheme and Its Application to Treadmill Control for Gait Rehabilitation, *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 2012, vol. 9, no. 1, p. 62, doi: 10.1186/1743-0003-9-62
9. Yoon J., Manurung A., Kim G.S. Impedance Control of a Small Treadmill with Sonar Sensors for Automatic Speed Adaptation, *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2014, vol. 12, no. 6, pp. 1323-1335, doi: 10.1007/s12555-013-0241-3
10. Minetti A.E., Boldrini L., Brusamolin L., Zamparo P., McKee T. A Feedback-Controlled Treadmill (Treadmill-on-Demand) and the Spontaneous Speed of Walking and Running in Humans, *Journal of Applied Physiology*, 2003, vol. 95, no. 2, pp. 838-843, doi: 10.1152/japplphysiol.00128.2003

11. Rida I., Almaadeed S., Bouridane A. Gait Recognition Based on Modified Phase-Only Correlation, *Signal, Image and Video Processing*, 2016, vol. 10, no. 3, pp. 463-470, doi: 10.1007/s11760-015-0766-4

Strukturparametrische Synthese des Qualitätsregelsystems für den Betrieb des Simulators auf Basis adaptiver Steuerung von Simulationswerkzeugen

Zusammenfassung: Es ist ein Schema des Simulators mit Beobachtern vorgeschlagen und sein Informationsmodell ist gezeigt. Die Aufgabe der strukturparametrischen Synthese des Simulatorsteuerungssystems ist gestellt. Ein Suchfilter für eindeutige Benutzerzustände ist eingeführt. Es ist die Beschreibung des Prinzips der Suche und der Bildung der Strategie der Benutzerdynamik gegeben. Eine Analyse der Ergebnisse der Studie und der Umfang ihrer Anwendung sind vorgestellt.

Synthèse structurelle et paramétrique du système de contrôle de la qualité du simulateur basé sur la gestion adaptative des outils de simulation

Résumé: Est proposé un schéma du simulateur avec des observateurs, est motré son modèle d'information. Est posée la tâche de la synthèse structurelle et paramétrique du système de contrôle du simulateur. Est présenté le filtre de la recherche des états uniques de l'utilisateur. Est donnée une description du principe de la recherche et de la formation de la stratégie de la dynamique de l'utilisateur. Sont présentés l'analyse des résultats de l'étude et leur champ d'application.

Авторы: ***Сиухин Александр Андреевич*** – аспирант кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; ***Карпушкин Сергей Викторович*** – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

УДК 519.6
DOI: 10.17277/vestnik.2022.03.pp.398-411

СИСТЕМА РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СНИЖЕНИЯ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

И. Ю. Пчелинцева

Кафедра «Системы автоматизированной поддержки принятия решений», irina_yu_10@mail.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия

Ключевые слова: база данных; гальваническое покрытие; задача оптимизации; кластер; параллельные вычисления.

Аннотация: Разработана структура информационной системы параллельных вычислений в распределенной компьютерной среде для решения задачи оптимизации – минимизации критерия неравномерности гальванического покрытия на плоской детали. Разработанное программное обеспечение позволяет принять решение (поиск конфигурации токонепроводящего экрана в гальванической ванне), обеспечивающее минимальную неравномерность покрытия. Проведен вычислительный эксперимент на кластере из трех узлов.

Введение

Одной из важных промышленных задач на сегодняшний день является нанесение равномерных гальванических покрытий на детали для защиты их от коррозии, повышения износостойкости и т.д. Как известно, основной трудностью при этом являются краевые эффекты в получаемом покрытии, то есть, если рассмотреть его профиль, то на краях детали толщина нанесенного металла будет больше, чем в середине.

Существует множество различных способов снижения неравномерности гальванических покрытий, например, использование многоанодных ванн [1, 2]. Главный недостаток в данном случае – подведение различных источников постоянного тока к анодам, что достаточно трудно обеспечить. Другим способом является создание тонкого токонепроводящего экрана с отверстиями, который устанавливается вблизи детали-катода. Варьируя количеством, шириной и расположением отверстий, изменяется профиль получаемого покрытия. Можно подобрать такую конфигурацию экрана, которая обеспечит минимальную неравномерность покрытия.

Для численной характеристики вводят критерий неравномерности гальванического покрытия R, выраженный через функцию распределения толщины металла по поверхности катода [3]. Чтобы вычислить значения данной функции, следует численно рассчитать распределение электрического потенциала в гальванической ванне, используя математическую модель – уравнение Лапласа и нелинейные краевые условия III рода на поверхности анода и катода [4]. Конфигурация токонепроводящего экрана определяет вид краевых условий на границе изоляционных частей экрана.

Таким образом, необходимо минимизировать величину R, выбирая конфигурацию экрана. Рассматриваемая математическая модель является, по сути, уравнениями связи для критерия R. Процесс изготовления самого экрана (обычно его

вырезают из тонкого листа стеклотекстолита [5]) по результатам расчетов не представляет особых трудностей в сравнении, например, со сборкой многоанодной ванны.

Как было показано в статье [6], рассматриваемая задача оптимизации требует много времени для ее численного решения методом полного перебора, так как для одного шага алгоритма (одной конфигурации экрана) необходимо численно решать большую систему нелинейных алгебраических уравнений из 900 уравнений, но используемый алгоритм можно распараллелить для повышения эффективности вычислительного метода.

Цель работы – разработка информационной системы численного поиска оптимальных параметров токонепроводящего экрана гальванической ванны, обеспечивающих наименьшее значение критерия R, используя распараллеливание метода полного перебора в распределенной компьютерной среде.

Дискретный аналог математической модели процесса нанесения гальванического покрытия

Рассмотрим гальваническую ванну, имеющую форму параллелепипеда, с плоскими бесконечно тонкими анодом и катодом, которые имеют прямоугольную форму. Пусть электроды располагаются по центру вдоль соответствующих стен напротив друг друга. Размеры дна ванны – $l \times l$. Внутри ванны параллельно электродам располагается поперечный бесконечно тонкий плоский токонепроводящий экран (стенка), который имеет отверстия прямоугольной формы. Высота экрана и таких отверстий совпадает с высотой ванны, ширина экрана равна l.

Таким образом, в любом горизонтальном сечении ванны конфигурация электрического поля не будет изменяться. Пример расположения элементов в данном случае представлен на рис. 1. Указанные размеры взяты из эксперимента.

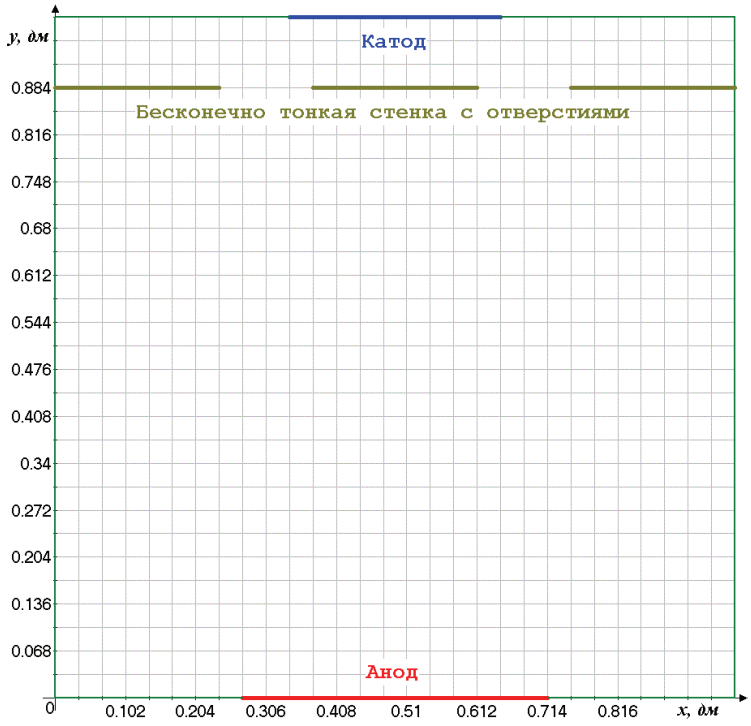


Рис. 1. Горизонтальное (продольное) сечение гальванической ванны с сеткой по координатам *x* и *y*

Для нахождения потенциалов в узлах сетки численно решается следующая система нелинейных алгебраических уравнений [6]:

$$\begin{cases} \dfrac{\varphi_{i-1,\,j} - 2\varphi_{i,\,j} + \varphi_{i+1,\,j}}{h_x^2} + \dfrac{\varphi_{i,\,j-1} - 2\varphi_{i,\,j} + \varphi_{i,\,j+1}}{h_y^2} = 0, \\ i = 2, \ldots, N_x - 1 \ \&\ j = 2, \ldots, N_y - 1 \ \&\ j \neq N_p, \\ i = p_r^{(k)} + 1, \ldots, p_l^{(k+1)} - 1 \ \&\ j = N_p,\ k = 1, \ldots, N_{pl}; \\ \dfrac{\varphi_{2,\,j} - \varphi_{1,\,j}}{h_x} = 0,\ j = 2, \ldots, N_y - 1 \ \&\ j \neq N_p; \\ \dfrac{\varphi_{N_x,\,j} - \varphi_{N_x-1,\,j}}{h_x} = 0,\ j = 2, \ldots, N_y - 1 \ \&\ j \neq N_p; \\ \dfrac{\varphi_{i,\,2} - \varphi_{i,\,1}}{h_y} = 0,\ i = 1, \ldots, a_l - 1,\ a_r + 1, \ldots, N_x; \\ \dfrac{\varphi_{i,\,N_y} - \varphi_{i,\,N_y-1}}{h_y} = 0,\ i = 1, \ldots, c_l - 1,\ c_r + 1, \ldots, N_x; \\ \dfrac{\varphi_{i,\,N_p} - \varphi_{i,N_p-1}}{h_y} = 0,\ i = p_l^{(m)}, \ldots, p_r^{(m)},\ m = 1, \ldots, N_{pl} + 1; \\ \varphi_{i,\,1} + F_a\left(-\chi\dfrac{\varphi_{i,\,2} - \varphi_{i,\,1}}{h_y}\right) - U = 0,\ i = a_l, \ldots, a_r; \\ \varphi_{i,\,N_y} - F_c\left(-\chi\dfrac{\varphi_{i,\,N_y} - \varphi_{i,\,N_y-1}}{h_y}\right) = 0,\ i = c_l, \ldots, c_r, \end{cases}$$

где h_x, h_y – шаги сетки по x и y, дм; N_x, N_y – максимальные номера узлов сетки по x и y; N_p – номер слоя сетки по j, где располагается изоляционный экран; N_{pl} – количество отверстий прямоугольной формы в токонепроводящем экране; a_l, a_r, c_l, c_r – номера узлов сетки, где находятся левый и правый край анода и катода соответственно; $p_l^{(m)}$, $p_r^{(m)}$ – номера узлов сетки, соответствующих краям частей изоляционного экрана; $m = 1, \ldots, N_{pl} + 1$ (*количество таких частей на единицу больше числа* N_{pl}); $F_a(i_a)$ и $F_c(i_c)$ – функции анодной и катодной поляризации соответственно, В; i_a, i_c – соответственно анодная и катодная плотности тока, А/дм^2; χ – удельная проводимость электролита, Ом·дм$^{-1}$; U – анодное напряжение, В.

Предположим, что отверстия имеют одинаковый размер и для введенной сетки $h_x = h_y$.

Приведенная нелинейная система алгебраических уравнений имеет количество неизвестных, равное $g = N_x N_y$.

Для дальнейших рассуждений объединим неизвестные величины

$$\varphi_{1,\,1}, \varphi_{1,\,2}, \ldots, \varphi_{1,\,N_y}, \varphi_{2,\,1}, \varphi_{2,\,2}, \ldots, \varphi_{2,\,N_y}, \ldots, \varphi_{N_x,\,1}, \varphi_{N_x,\,2}, \ldots, \varphi_{N_x,\,N_y}$$

в вектор $\Psi = [\psi_1, \psi_2, \ldots, \psi_g]^{\mathrm{T}}$.

Как принято в литературе по вычислительной математике, система нелинейных уравнений перепишется в векторной форме

$$\Lambda(\Psi) = 0\,, \tag{1}$$

где $\Lambda(\Psi)$ – векторная функция от Ψ из g-компонент.

Для нахождения приближенного решения Ψ^* системы (1) в статьях [6, 7] используется метод Ньютона. Методика выбора начального приближения $\Psi^{(0)}$ представлена в работе [6]. При этом имплементация самого метода находится в математическом пакете Maxima. Разработанная программа на языке C++ готовит для пакета скрипт (текстовый файл) с командами, символьным видом каждого уравнения системы (1) и начальным приближением. Далее с помощью библиотечной функции system() вызывается Maxima. После этого программа через перенаправление ввода/вывода считывает результаты работы – поле потенциалов в гальванической ванне.

Например, для сетки из 900 узлов время, затрачиваемое пакетом на решение системы нелинейных уравнений, на компьютере с процессором Intel Core i5-9400 с тактовой частотой 2,9 ГГц составляет примерно 18 мин с точностью 0,01. Отметим, что в реализации метода Ньютона в библиотеке пакета на каждой итерации якобиан системы не обращается, а используется LU-разложение для быстрого решения получаемой линеаризованной системы алгебраических уравнений.

Распределение толщины получаемого покрытия на детали вычисляется по следующей формуле:

$$\delta_i = \frac{k_{Me}\chi}{\rho}\frac{\varphi_{i,\,N_y-1} - \varphi_{i,\,N_y}}{h_y}\Delta t\,, \tag{2}$$

где $i = c_l, \ldots, c_r$; k_{Me} – электрохимический эквивалент металла покрытия, г/(А·ч); ρ – плотность металла покрытия, г/ см^3; Δt – время процесса (нанесения покрытия), ч.

Критерий неравномерности гальванического покрытия вычисляется по формуле [6]

$$R = \frac{1}{c_r - c_l}\left(\frac{\delta_{c_l} + \delta_{c_r}}{2\delta_{\min}} + \frac{\sum\limits_{i=c_l+1}^{c_r-1}\delta_i}{\delta_{\min}} + c_l - c_r\right)100\,\%,$$

где $\delta_{\min} = \min\limits_i \delta_i$.

Таким образом, после расчета δ_i, определяемых по полученным значениям потенциалов вблизи катода, можно вычислить значение критерия R.

Постановка задачи оптимизации

Как показали многочисленные расчеты, на значение критерия R слабо влияет положение отверстий в экране (изменение на 1 – 2 %), но сильно воздействует количество N_{pl} и ширина PL отверстий, когда экран достаточно близок к катоду [6]. Будем считать, что положение N_p экрана фиксировано.

Далее в оптимизационной задаче варьируемыми параметрами будут величины N_{pl} и PL. При этом все прямоугольные отверстия имеют одинаковые размеры и расположены симметрично относительно середины экрана.

Так как все вычисления проводятся на сетке, то значение PL нужно брать как количество шагов сетки, которые покрывает отверстие. Тогда ширина каждого отверстия вычисляется достаточно просто – как PLh_x.

Поскольку значения N_{pl} и PL целые, имеем задачу дискретного программирования.

Затем определим диапазоны изменения N_{pl} и PL. Зададим $N_{\max}$ – максимальное число отверстий в экране. Таким образом, целая величина N_{pl} будет меняться от 1 до $N_{\max}$.

Чтобы поле проходило через отверстия, минимальная величина PL равна двум. Максимальное значение ширины $PL = PL_{\max}$ нужно брать, задав минимальное значение ширины $L_{pr_{\min}} = 2$ изоляционных частей экрана, измеряемое в шагах сетки. Если задается количество отверстий в экране, то понятно, что величина $PL_{\max}(N_{pl})$ будет зависеть от N_{pl}. Тогда имеем равенство

количество шагов сетки по x = количество шагов сетки под отверстия +
+ количество шагов сетки под изоляционные части

или по-другому

$$N_x - 1 = PL_{\max}(N_{pl})N_{pl} + L_{pr_{\min}}(N_{pl} + 1). \qquad (3)$$

Тогда с учетом целочисленного значения $PL_{\max}$ получаем формулу

$$PL_{\max}(N_{pl}) = \left[\frac{N_x - 1 - L_{pr_{\min}}(N_{pl} + 1)}{N_{pl}}\right],$$

где $[a]$ – целая часть числа a.

Однако не все комбинации параметров N_{pl} и PL допустимы. Например, при заданных значениях N_{pl} и PL может получиться дробное значение ширины $L_{pr}(N_{pl}, PL)$ каждой изоляционной части экрана, то есть их нельзя уложить на заданной сетке. Тогда запишем соотношение, аналогичное формуле (3):

$$N_x - 1 = PLN_{pl} + L_{pr}(N_{pl}, PL)(N_{pl} + 1),$$

откуда имеем

$$L_{pr}(N_{pl}, PL) = \frac{N_x - 1 - PLN_{pl}}{N_{pl} + 1}.$$

Следовательно, если получаемое значение L_{pr} – целое, то пара N_{pl} и PL допустима.

Система (1) и соотношение (2) будут являться уравнениями связи. Рассмотрим формирование некоторых уравнений системы (1) по заданным значениям пары N_{pl} и PL.

Чтобы вычислить номер узла $p_l^{(m)}$ $(m = 1, \ldots, N_{pl} + 1)$ сетки, соответствующего левой границе m-й части изоляционного экрана, следует сложить $m - 1$ отверстий PL и изоляционных частей L_{pr}, а также прибавить единицу, то есть

$$p_l^{(m)} = (m - 1)(PL + L_{pr}) + 1.$$

Для правой границы

$$p_r^{(m)} = p_l^{(m)} + L_{pr}.$$

Таким образом, получаем следующую задачу дискретного программирования:

$$R(N_{pl}, PL) \to \min;$$
$$\begin{cases} N_{pl} \in [1, N_{\max}]; \\ PL \in [2, PL_{\max}(N_{pl})]; \\ L_{pr}(N_{pl}, PL) - \text{целое}; \\ N_{pl}, PL - \text{целые}; \\ \text{Система (1) и соотношение (2)} - \textit{уравнения связи}. \end{cases} \quad (4)$$

Поскольку правая граница для варьируемого параметра PL зависит от выбора значения параметра N_{pl}, то для решения задачи (4) будем использовать метод полного перебора [6], который имеет два преимущества: простоту и гарантированное нахождение оптимального решения.

Информационная система реализации метода полного перебора в распределенной компьютерной среде

Как отмечено в статье [6], время, затрачиваемое на последовательный алгоритм полного перебора для решения задачи (4) (17 комбинаций), на компьютере с процессором Intel Core i5-9400 составляет 5 ч 6 мин. Для уменьшения времени вычислений такой алгоритм может быть распараллелен.

Опишем алгоритм работы программы параллельных вычислений решения задачи (4) на вычислительном кластере. Кластер [8] – это группа компьютеров (вычислительных узлов), к которой можно получить доступ как к единой системе (распределенной компьютерной среде).

Алгоритм проведения параллельных вычислений представлен на рис. 2.

Поскольку параллельные процессы могут быть запущены не только на одном компьютере, но и в рамках компьютерной сети на разных ЭВМ (вычислительных узлах), то здесь необходима общая память. Такой памятью будет сетевая база данных. Предполагаем, что на одном узле будет запущен один процесс.

Главный процесс формирует задания, записывая в базу возможные значения пар N_{pl} и PL, запускает M параллельных процессов перебора возможных значений вариантов конфигурации токонепроводящего экрана для решения уравнений соответствующих дискретных моделей (1), а затем ищет такую конфигурацию, которая обеспечивает минимум критерию R, извлекая полученные данные из базы.

Предположим, что каждый узел имеет одинаковую производительность. Тогда главный процесс должен распределить примерно одинаковое количество C_i заданий на каждый узел, $i = 1, \ldots, M$.

Для решения данной задачи обозначим через N_{conf} число комбинаций допустимых значений N_{pl} и PL для задачи (4). Первоначально следует присвоить

$$C_i := \left[\frac{N_{conf}}{M} \right].$$

Далее вычислить остаток от деления

$$r := N_{conf} \bmod M$$

и распределить его по r узлам, то есть

$$C_j := C_j + 1$$

для $j = 1, \ldots, r$.

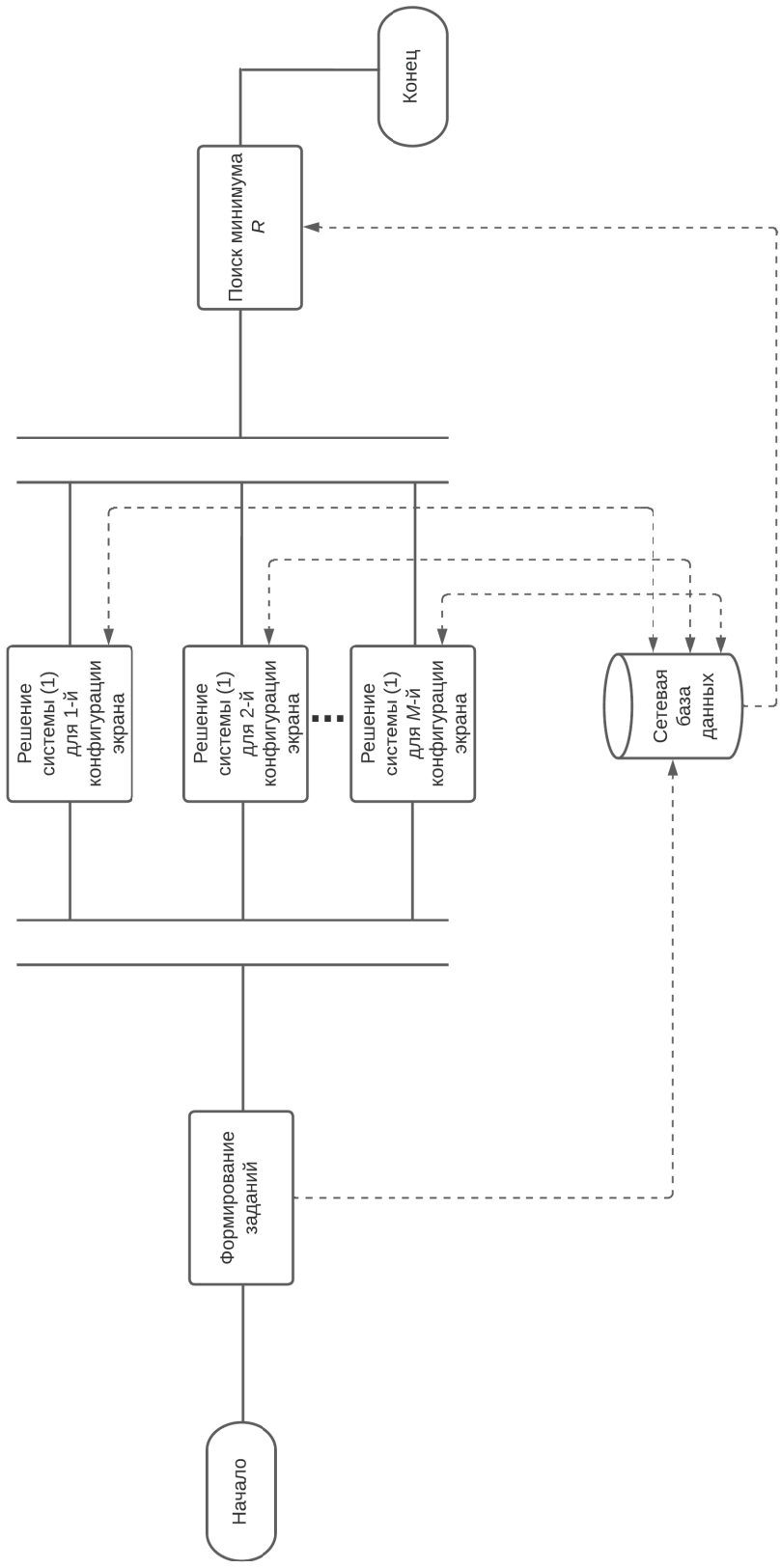


Рис. 2. Алгоритм проведения параллельных вычислений в распределенной компьютерной среде

Когда $N_{conf} > M$, то хотя бы на один узел будет выдано более одного задания. Рассмотрим алгоритм формирования номеров заданий.

Занумеруем допустимые комбинации значений N_{pl} и PL (то есть задания) для задачи (4) от 1 до N_{conf}. Тогда для i-го процесса номера заданий берутся от

$$P_i = \sum_{q=1}^{i-1} C_q + 1$$

до

$$P_i + C_i - 1 .$$

Работа параллельных процессов в распределенной компьютерной среде осуществляется с помощью функций библиотеки языка C, входящей в программный пакет MPICH. Запущенный процесс, используя библиотечную функцию MPI_Comm_rank(), получает свой номер, по которому извлекает из базы данных задания для расчетов.

Структура базы данных

В базе данных будет храниться следующая информация: номер задания, то есть идентификатор idconf конфигурации экрана, флаг flcalc расчета (0 – не досчитали (возникла ошибка), 1 – все удачно вычислено), значения N_{pl}, PL и критерия R, номер numproc вычислительного процесса и пару – номер NumCoord координаты (на сетке) на катоде, для которой вычислена толщина покрытия, и само значение delta толщины.

Заметим, что поле idconf имеет уникальное значение и определяет всю информацию для рассматриваемого задания. Поэтому idconf будет первичным ключом. Полученная структура сетевой базы данных представлена на рис. 3.

Для создания связанных таблиц в СУБД MySQL приведем запросы на языке SQL:

```
/* Данные об обрабатываемых конфигурациях экрана */
CREATE TABLE ConfigTable (
  idconf  INT NOT NULL,   /* ID конфигурации                  */
  flcalc  INT DEFAULT 0,  /* Флаг расчета: 0 - не досчитали,
                                     1 - все удачно вычислено */
  Npl     INT,       /* Количество отверстий в экране        */
  PL      INT,       /* Ширина отверстий                     */
  R       INT,       /* Величина неравномерности покрытия в %  */
  numproc INT,       /* Номер вычислительного процесса       */
  PRIMARY KEY (idconf)
)ENGINE=InnoDB;
```

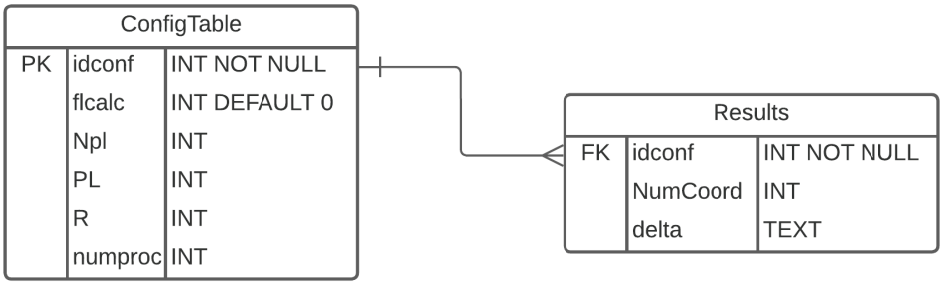


Рис. 3. Даталогическая модель базы данных

```
/* Таблица с результатами вычислений */
CREATE TABLE Results (
  idconf   INT NOT NULL,
  NumCoord INT,          /* Номер координаты */
  delta    TEXT,         /* Толщина покрытия */
  FOREIGN KEY (idconf) REFERENCES ConfigTable (idconf)
                       ON UPDATE CASCADE ON DELETE CASCADE
)ENGINE=InnoDB;
```

Отметим, что каждый из параллельных процессов при запуске по своему номеру numproc из таблицы ConfigTable извлекает набор соответствующих записей с заданиями. Приведем пример такого запроса:

```
SELECT idconf,Npl,PL FROM ConfigTable WHERE numproc = 1;
```

Программная реализация метода решения задачи (4)

Для решения задачи (4) взяты следующие функции и параметры [6]:

$$F_a(i_a) = 1,2;\ F_c(i_c) = 0{,}0016 i_c^2 + 0{,}055 i_c + 1{,}347;$$

$$\chi = 0{,}35\ (\text{Ом}\cdot\text{дм})^{-1};\ k_{Me} = 1{,}22\ \text{г/(А}\cdot\text{ч)};\ \rho = 7{,}133\ \text{г/см}^3;\ \Delta t = 0{,}67\ \text{ч};\ U = 3{,}67\ \text{В};$$

$$N_x = N_y = 30;\ N_p = 27;\ a_l = 9;\ a_r = 22;\ c_l = 11;\ c_r = 20;\ h_x = h_y = 0{,}034\ \text{дм}.$$

Пусть $N_{\max} = 7$. В этом случае получаем $N_{conf} = 17$ комбинаций допустимых значений N_{pl} и PL для задачи (4) [6].

Расчеты проводились на вычислительном кластере из трех узлов, на котором развернута система виртуализации Proxmox Virtual Environment, управляемая удаленно через веб-интерфейс. На каждом узле установлена операционная система Arch Linux x86_64 с версией ядра 5.13.19-2-pve, математический пакет Maxima 5.46.20 и библиотека параллельных вычислений MPICH. На одном из узлов также развернут сервер СУБД MySQL. 17 комбинаций допустимых значений N_{pl} и PL распределены по 17 параллельным процессам, то есть по одной задаче на каждый процесс. При этом каждый узел имеет центральный процессор Intel Xeon CPU E5-2620 с 12-ти ядрами и тактовой частотой 2,1 ГГц. Поэтому схема запуска MPI-приложения на таком кластере следующая (с наименьшей неравномерной загрузкой):

5:6:6.

Здесь каждое число отвечает за количество параллельных процессов, запущенных на соответствующем узле. При этом уже на один узел распределяется более одного процесса, так как работа ведется с многоядерной системой.

Динамика загрузки процессоров по всем узлам приведена на рис. 4 (данные получены из Proxmox).

Главный процесс после занесения в базу данных заданий запускает параллельные процессы командой

```
mpiexec -n 17 -f machinefile ./pcalcs
```

Содержимое файла machinefile (схема запуска MPI-приложения):

```
node1:5
node2:6
node3:6
```

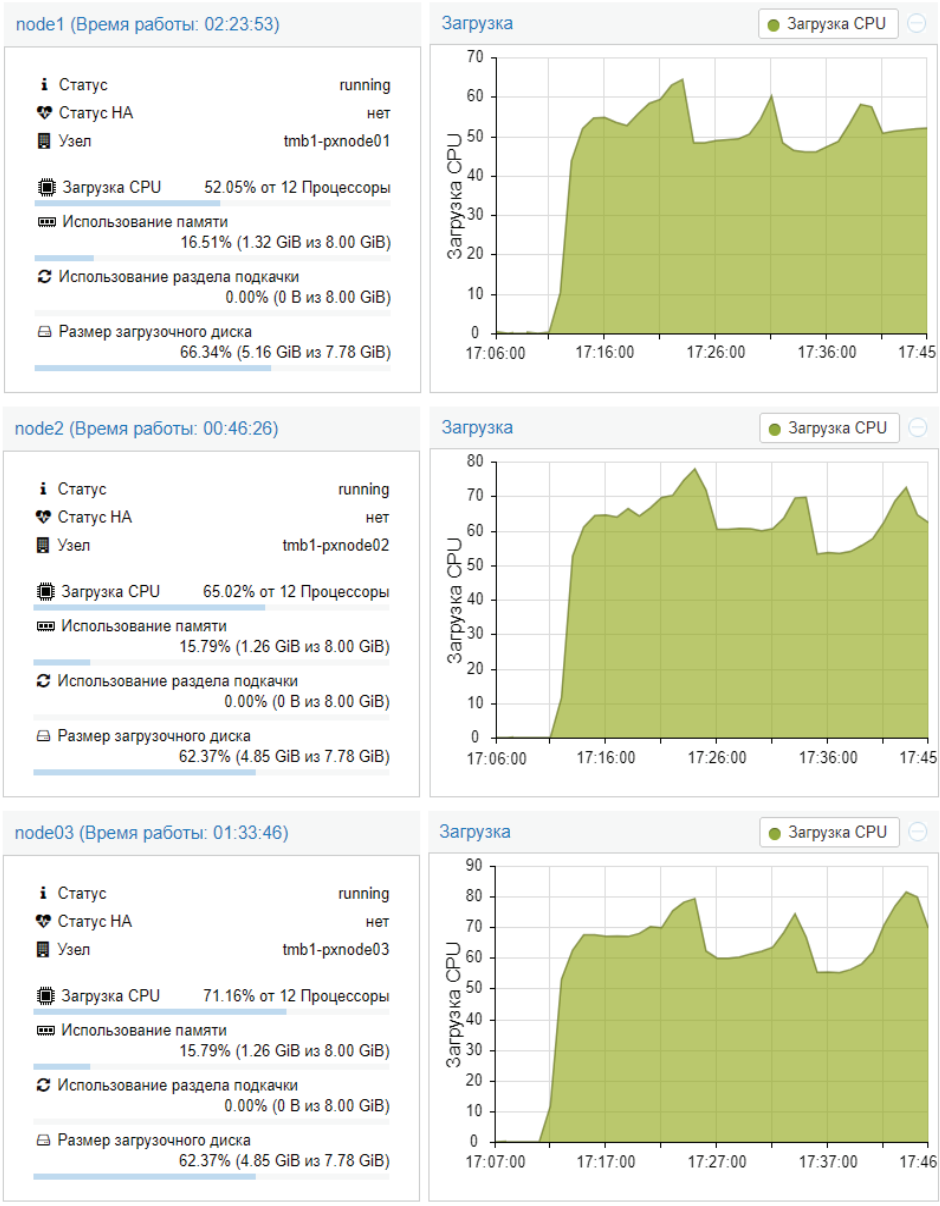


Рис. 4. Динамика загрузки узлов вычислительного кластера

Из динамики загрузки двенадцати ядер можно сказать, что работа шести параллельных процессов часто распределяется *в среднем* по двум ядрам процессора на каждый процесс, при этом наблюдается пиковая нагрузка (см. рис. 4). Откуда можно сделать вывод, что для данной задачи и конфигурации кластера 6 – это максимальное число параллельных процессов, которые можно запустить на одном 12-ядерном узле.

Затраты памяти в среднем: на первом узле для пяти параллельных процессов – 1,32 Гбайт, на втором и третьем узлах для шести – по 1,26 Гбайт.

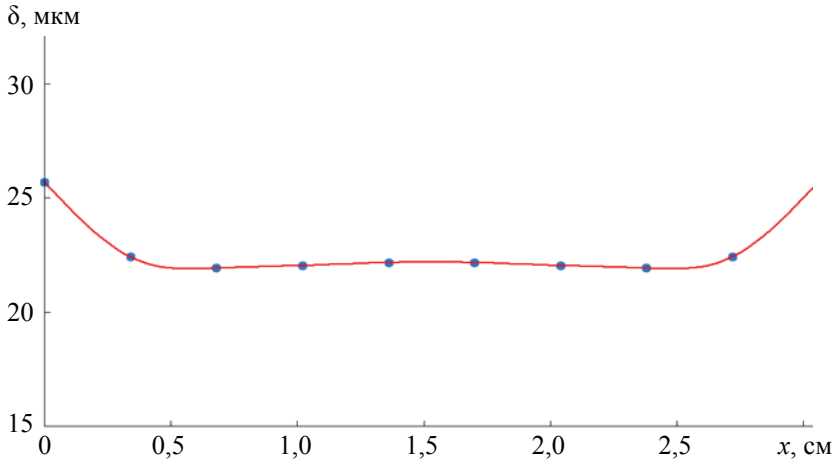


Рис. 5. Распределение покрытия по поверхности детали

Далее приведен итоговый вывод главного процесса.

```
[irina@node1 parallel_wall_zn]$ ./compile
[irina@node1 parallel_wall_zn]$ ./parallel_wall_zn

Программа параллельных вычислений оптимальной конфигурации
токонепроводящего экрана в гальванической ванне

Copyright 2022 Пчелинцева И.Ю., Литовка Ю.В. <irina_yu_10@mail.ru>
Npl_min = 2
PL_min = 7
Rmin = 2 %
Время вычислений = 43.5 мин.
```

На рисунке 5 построен график оптимального распределения толщины получаемого покрытия на детали при минимальном значении $R = 2$ %. Для наглядности точки соединены кубическим сплайном.

Заключение

Разработаны структура информационной системы параллельных вычислений в распределенной компьютерной среде для решения задачи снижения неравномерности гальванических покрытий на плоских деталях прямоугольной формы; специальное программное обеспечение, реализующее такую вычислительную схему, для которого получено свидетельство о государственной регистрации [9]. При этом снижена неравномерность загрузки вычислительных узлов кластера при решении данной задачи. Таким образом, данная информационная система позволяет за наименьшее время принять оптимальное решение для построения токонепроводящего экрана в гальванической ванне. Для рассматриваемого примера в экране должно быть два симметричных отверстия шириной в $7h_x = 0{,}238$ дм.

Такая программная реализация показала свою эффективность: время работы для последовательного алгоритма – 5 ч 6 мин, для параллельного алгоритма – 43,5 мин, но при этом повышаются затраты памяти и процессоров вычислительной среды.

Список литературы

1. Конкина, В. В. Постановка задачи оптимального управления реверсивным режимом нанесения гальванического покрытия в ванне со многими анодами / В. В. Конкина, Д. С. Соловьев, Ю. В. Литовка // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 2. – С. 248 – 256. doi: 10.17277/vestnik.2015.02.pp.248-256
2. Поиск оптимального управления токовыми режимами в гальванических процессах со многими анодами при разнообразии номенклатуры обрабатываемых изделий / А. В. Дутов, Ю. В. Литовка, В. А. Нестеров [и др.] // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2019. – № 1. – С. 78 – 88. doi: 10.1134/S0002338819010062
3. Симагин, Д. Н. Процесс получения наномодифицированных цинковых покрытий с повышенной равномерностью / Д. Н. Симагин, Ю. В. Литовка // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2013. – Т. 19, № 4. – С. 886 – 889. EDN: RSXNXZ
4. Пчелинцева, И. Ю. Математическая модель и численная схема расчета электрических полей в гальванических ваннах с плоским токонепроводящим экраном / И. Ю. Пчелинцева, Ю. В. Литовка // Дифференциальные уравнения и процессы управления. – 2021. – № 3. – С. 85 – 97. EDN: AIJTOO
5. Пчелинцева, И. Ю. О проверке адекватности модели электрического поля в гальванической ванне с плоским токонепроводящим экраном / И. Ю. Пчелинцева // Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации : материалы XXX Междунар. науч.-техн. конф., 14 – 20 сентября 2021 г., Алушта. – М., 2021. – С. 75–76. EDN: KPENBD
6. Пчелинцева, И. Ю. Система автоматизированного управления процессом нанесения гальванического покрытия в ванне с токонепроводящим экраном / И. Ю. Пчелинцева, Ю. В. Литовка // Мехатроника, автоматизация, управление. – Т. 23, № 4. – С. 188 – 196. doi: 10.17587/mau.23.188-196
7. Pchelintseva, I. Yu. Modeling of Metal Distribution when Coating Flat Metal Plates in Electroplating Baths / I. Yu. Pchelintseva, A. N. Pchelintsev, Yu. V. Litovka // International Journal of Numerical Modeling: Electronic Networks, Devices and Fields. – 2021. – Vol. 34, No. 2. – e2830. doi: 10.1002/jnm.2830
8. Прошин, А. А. Система управления кластерами и сетями «Mosix» / А. А. Прошин, Н. В. Горячев, Н. К. Юрков // NovaInfo.Ru. – 2018. – № 88. – С. 21 – 26. EDN: XWCFPN
9. Свидетельство о гос. рег. программ для ЭВМ № 2022662881. Программа параллельных вычислений оптимальной конфигурации токонепроводящего экрана в гальванической ванне / И. Ю. Пчелинцева, Ю. В. Литовка (РФ). – Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ. – 07.07.2022 г.

A Distributed Information Processing System to Solve the Problem of Reducing Electroplating Unevenness

I. Yu. Pchelintseva

Department of Automated Decision Support Systems,
irina_yu_10@mail.ru; TSTU, Tambov, Russia

Keywords: database; electroplated coating; optimization problem; cluster; parallel computing.

Abstract: The structure of an information system for parallel computing in a distributed computer environment has been developed for solving an optimization problem - minimizing the criterion for the non-uniformity of a galvanic coating on a flat part. The developed software makes it possible to make a decision (search for the configuration of a non-conductive screen in a galvanic bath), which ensures the minimum non-uniformity of the coating. A computational experiment was carried out on a cluster of three nodes.

References

1. Konkina V.V., Solov'yev D.S., Litovka Yu.V. [Statement of the problem of optimal control of the reverse mode of electroplating in a bath with many anodes], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 2, pp. 248-256, doi: 10.17277/vestnik.2015.02.pp.248-256 (In Russ., abstract in Eng.)

2. Dutov A.V., Litovka Yu.V., Nesterov V.A., Solov'yev D.S., Solov'yeva I.A., Sypalo K.I. [Search for the optimal control of current modes in galvanic processes with many anodes with a variety of processed products], *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Theory and control systems], 2019, no. 1, pp. 78-88, doi: 10.1134/S0002338819010062 (In Russ.)

3. Simagin D.N., Litovka Yu.V. [The process of obtaining nanomodified zinc coatings with increased uniformity], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2013, vol. 19, no. 4, pp. 886-889, EDN: RSXNXZ (In Russ., abstract in Eng.)

4. Pchelintseva I.Yu., Litovka Yu.V. [Mathematical model and numerical scheme for calculating electric fields in electroplating baths with a flat non-conductive screen], *Differentsial'nyye uravneniya i protsessy upravleniya* [Differential equations and control processes], 2021, no. 3, pp. 85-97, EDN: AIJTOO (In Russ.)

5. Pchelintseva I.Yu. *Sovremennyye tekhnologii v zadachakh upravleniya, avtomatiki i obrabotki informatsii* [Modern technologies in control, automation and information processing], Proceedings of the XXX International Scientific and Technical Conference, 14 - 20 September, 2021, Alushta, Moscow, 2021, pp. 75-76, EDN: KPENBD (In Russ.)

6. Pchelintseva I.Yu., Litovka Yu.V. [Automated control system for the process of electroplating in a bath with a non-conductive screen], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye* [Mechatronics, automation, control], vol. 23, no. 4, pp. 188-196, doi: 10.17587/mau.23.188-196 (In Russ., abstract in Eng.)

7. Pchelintseva I.Yu., Pchelintsev A.N., Litovka Yu.V. Modeling of Metal Distribution when Coating Flat Metal Plates in Electroplating Baths, *International Journal of Numerical Modeling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 2021, vol. 34, no. 2, e2830, doi: 10.1002/jnm.2830

8. Proshin A.A., Goryachev N.V., Yurkov N.K. [Control system for clusters and networks “Mosix”], *NovaInfo.Ru*, 2018, no. 88, pp. 21-26, EDN: XWCFPN (In Russ.)

9. Pchelintseva I.Yu., Litovka Yu.V. *Programma parallel'nykh vychisleniy optimal'noy konfiguratsii tokoneprovodyashchego ekrana v gal'vanicheskoy vanne* [Program for parallel computing of the optimal configuration of a non-conductive screen in a galvanic bath], Russian Federation, 2022, Certificate of state registration of the computer program No. 2022662881. (In Russ.)

Verteiltes Datenverarbeitungssystem zur Lösung des Problems der Verringerung der Ungleichmäßigkeit von galvanischen Beschichtungen

Zusammenfassung: Es ist die Struktur des Informationssystems für parallele Berechnungen in einer verteilten Computerumgebung entwickelt, um das Problem der Optimierung zu lösen – das Kriterium für die Ungleichmäßigkeit der galvanischen Beschichtung auf einem flachen Teil zu minimieren. Die entwickelte Software ermöglicht eine Entscheidung zu treffen (Suche nach der Konfiguration des leitenden Schirmes im galvanischen Bad), die eine minimale Ungleichmäßigkeit der Beschichtung gewährleistet. Ein Computerexperiment ist auf einem Cluster von drei Knoten durchgeführt.

Système du traitement de l'information distribuée pour résoudre le problème de la réduction de l'hétérogénéité de galvanoplastie

Résumé: Est élaborée la structure du système d'information des calculs parallèles dans un environnement informatique distribué pour résoudre le problème de l'optimisation – minimization du critère de l'hétérogénéité de la galvanoplastie sur une pièce plane. Le logiciel élaboré permet une solution (recherche de la configuration de l'écran conducteur dans le bain galvano) qui assure un minimum de l'hétérogénéité de la couverture. Est réalisée une expérience de calcul sur un cluster de trois nœuds.

Автор: ***Пчелинцева Ирина Юрьевна*** **–** аспирант кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

УДК 517:621.316
DOI: 10.17277/vestnik.2022.03.pp.412-427

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КВАДРАТИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ПРИ ОБЪЕМНО-ПЛАНИРОВОЧНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПРОИЗВОДСТВА

В. М. А. Абас[1], С. Я. Егоров[2]

Кафедра прикладной математики,
ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова» (1), Новочеркасск, Ростовская обл., Россия;
Кафедра «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», egorovsy@yandex.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ» (2), Тамбов, Россия

Ключевые слова: ангарный цех; компоновка оборудования; критерии и методы оптимизации; метрические параметры; ограничения размещения; оптимизация; сетка колонн; топологические параметры; транспортные сети.

Аннотация: Рассмотрена задача оптимального размещения оборудования внутри помещений и определения оптимальных параметров транспортно-трубопроводных сетей. Приведены фиксированный набор позиций аппаратов и матрица расстояний на основе ортогональной метрики. Исследованы и реализованы на ЭВМ метод Монте-Карло, комбинаторные аналоги метода Гаусса–Зейделя, генетического алгоритма и соответствующие гибридные методы, а также известные методы получения начального размещения, а именно алгоритмы последовательного размещения и размещения по критерию связности для решения задачи квадратичного назначения при оптимальном размещении элементов оборудования в цехах предприятий. Проведена серия вычислительных экспериментов на основе процедуры мультистарта, которые показали удовлетворительные вычислительные качества предложенных вариантов методов, а также позволили выявить их достоинства и недостатки. Установлено, что наилучшими характеристиками обладают метод Гаусса–Зейделя и гибридные аналоги на его основе. Рассмотрена задача из области автоматизированного проектирования наиболее сложного и трудоемкого этапа проектирования многоассортиментных производств – определение рациональной компоновки производства. Решена актуальная прикладная задача оптимального размещения оборудования производства фенил-гамма-кислоты и фенил-и-кислоты как для однократных, так и многократных соединений аппаратов.

1. Введение. Постановка задачи

Компоновка или объемно-планировочное решение производства – операция конструкционного проектирования производства, в результате которой определяют состав производственных помещений, их размеры и рациональное взаимное

расположение, а также выполняют в определенном масштабе чертежи поэтажных планов и разрезов. При этом решаются задачи выбора типа строительной конструкции; определения состава производственных помещений, их размеров и рационального взаимного расположения; размещения оборудования внутри помещений; трассировки внутрицеховых трубопроводов; выбора и размещения трубопроводной арматуры, определения оптимальных параметров транспортно-трубопроводных сетей.

При решении поставленной задачи применяются различные критерии и ограничения [1 – 17]. В результате расчета находятся координаты расположения отдельных элементов оборудования на сетке колонн (**СК**) и топологические характеристики их соединений. При конструктивно однотипных элементах позиции для их установки на СК фиксированы, расположены в узлах прямоугольной решетки и могут быть описаны следующей системой параметров: числом позиций n_x, n_y, n_z и шагами между ними h_x, h_y, h_z соответственно по ширине, длине и высоте СК. Критерием в большинстве случаев является критерий минимума взвешенной длины (**МСВД**) соединений.

Даны элементы $e_1, ..., e_n$, для каждой их пары заданы веса $r_{ij}(i, j = 1, ..., n)$, определяющие «степень связи» данных элементов и образующие матрицу соединений $\mathbf{R} = \{r_{ij}\}_{i,j=1,...,n}$. Имеется набор позиций для размещения элементов $p_1, ..., p_m\ (m \geq n)$. Без ограничения общности будем полагать, что $m = n$. Определим расстояния $d_{ij}(i, j = 1, ..., n)$ между парами позиций, определяющие симметричную матрицу $\mathbf{D} = \{d_{ij}\}_{i,j=1,...,n}$ с нулевой главной диагональю $d_{ii}(i = 1, ..., n)$. Для вычисления элементов матрицы **D** используется ортогональная метрика. Пример СК приведен на рис. 2. Длина соединений между элементами e_i и e_j оценивается величиной $L_{ij} = r_{ij} d_{p(i)p(j)}(i, j = 1, ..., n)$.

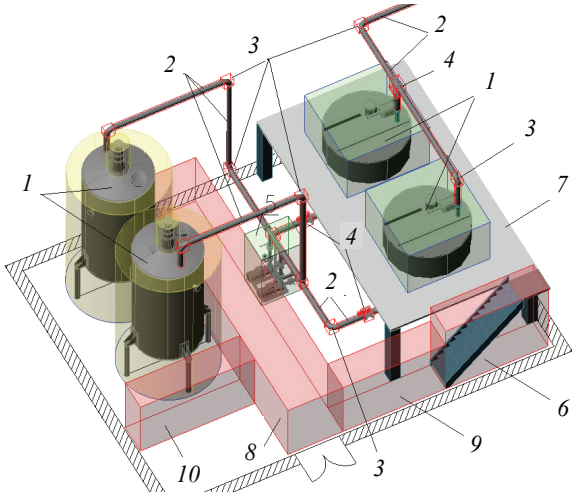


Рис. 1. Описание объектов фрагмента компоновки оборудования:
1 – аппараты; *2* – трубопроводы; *3* – соединительные детали трубопроводов; *4* – трубопроводная арматура; *5* – блок насосов; *6* – лестница; *7* – площадка обслуживания; *8*, *9* – проходы; *10* – зона обслуживания аппарата

Обозначим через E_s множество всех фиксированных элементов, включая элемент e_0, тогда суммарная взвешенная длина соединений элемента e_i с элементами из E_s оценивается по формуле

$$a_{ip(i)} = \sum_{s \in E_s} r_{is} d_{p(i)s} \ (i, j = 1, ..., n),$$

где $d_{p(i)s}$ – расстояние между элементом e_i, находящимся в позиции p_i, и элементом e_s.

С учетом симметричности матриц **R** и **D**, запишем выражение для суммарной взвешенной длины соединений при произвольном размещении

$$F(p) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} r_{ij} d_{p(i)p(j)} + \sum_{i=1}^{n} a_{ip(i)} . \qquad (1)$$

Для ортогональной метрики задача размещения по критерию МСВД соединений состоит в минимизации функционала

$$F(p) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} r_{ij} \left(\left| x_i - x_j \right| + \left| y_i - y_j \right| \right) + \sum_{i=1}^{n} \sum_{s \in E_s} r_{is} \left(\left| x_i - x_s^0 \right| + \left| y_i - y_s^0 \right| \right)$$

на множестве перестановок P соединений.

Данная задача является вариантом общей математической модели, получившей название задачи квадратичного назначения [1, 7 – 9].

Геометрическое ограничение – в одной ячейке размещается не более одного элемента, то есть

$$\min_{i, j=1,...,n} \max \left\{ \frac{\left| x_i - x_j \right|}{h_x}, \frac{\left| y_i - y_j \right|}{h_y} \right\} \geq 1; \quad \min_{i=1,...,n} \max \left\{ \frac{\left| x_i - x_s^0 \right|}{h_x}, \frac{\left| y_i - y_s^0 \right|}{h_y} \right\} \geq 1;$$

$$x_i = I_i h_x, \ \ y_i = J_i h_y, \ i = 1, \ldots, n; \quad I_i \in \{1, ..., n\}, \ J_i \in \{1, ..., n\}.$$

Универсальная аналитическая модель процесса размещения может быть разработана на основе обобщенной модели компоновки промышленных объектов [17] с учетом особенностей компоновки оборудования в ангарных цехах (фиксированный шаг сетки колонн). Основные ограничения модели учитывают (применяются обозначения из [17]):

– условие размещения оборудования внутри цеха:

$$\begin{cases} a_i/2 + \Delta x \leq x_i \leq x_c - a_i/2 - \Delta x; \\ b_i/2 + \Delta y \leq y_i \leq y_c - b_i/2 - \Delta y; \\ 0 \leq z_i \leq z_c - c_i - \Delta z, \ \forall i \in A^{18}; \end{cases} \qquad (2)$$

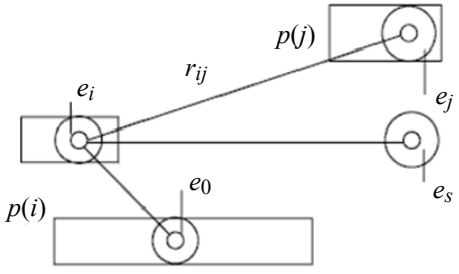


Рис. 2. Представление сетки колонн

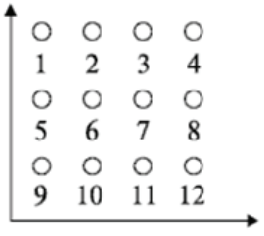


Рис. 3. Фиксированный набор из 12 позиций для планарной модели

– условие выполнения требования транспорта веществ самотеком

$$z_{f_{1l}} - H_{f_{1l}} \geq z_{f_{2l}} + C_{f_{2l}} - H_{f_{2l}}, \qquad \forall l : f_{4l} = 1; \tag{3}$$

– непересечение аппаратов друг с другом:

$$\left[(z_i = z_j) \wedge \left\{ \left(\left(x_i + \lambda_x \frac{a_i}{2} + \delta_x^i \right) - \left(x_j - \lambda_x \frac{a_i}{2} - \delta_x^j \right) \right) \lambda_x \langle\, 0, \vee \right.\right.$$

$$\left.\left. \vee \left(\left(y_i + \lambda_y \frac{b_i}{2} + \delta_y^i \right) - \left(y_i - \lambda_y \frac{b_i}{2} - \delta_y^i \right) \right) \lambda_y < 0 \right\} \vee \left[z_i \neq z_j \right] \right], \tag{4}$$

$\forall i, j \in A^{20}$; $\lambda_x = \operatorname{sign}(x_j - x_i)$; $\lambda_y = \operatorname{sign}(y_j - y_i)$;

– непересечение аппаратов со строительными колоннами

$$\left\{ \left(x_i - a_i/2 \geq \left[\frac{x_i}{h_x} \right] h_x + \frac{\beta_x}{2} \right) \wedge \left(x_i + a_i/2 \leq \left[\frac{x_i + h_x}{h_x} \right] h_x - \frac{\beta_x}{2} \right) \right\} \vee$$

$$\vee \left\{ \left(y_i - b_i/2 \geq \left[\frac{y_i}{h_y} \right] h_y + \frac{\beta_y}{2} \right) \wedge \left(y_i + b_i/2 \leq \left[\frac{y_i + h_y}{h_y} \right] h_y - \frac{\beta_y}{2} \right) \right\}. \tag{5}$$

$$\forall i \in A^{21};$$

– возможность размещения оборудования в отдельном блоке

$$\max_j \left(x_j + \frac{a_j}{2} \right) \leq x_i \vee x_i \leq \min_j \left(x_j - \frac{aj}{2} \right) \vee \max_j \left(y_j + \frac{b_j}{2} \right) \leq y_i \vee$$

$$\vee\, y_i \leq \min_j \left(y_j - \frac{bj}{2} \right) \vee \max_j \left(z_j + \frac{c_j}{2} \right) \leq z_i \vee z_i \leq \min_j (z_j), \ \forall j \in A^{22}, \ i \in A \setminus A^{22}; \tag{6}$$

– обеспечение зон для движения транспортных устройств:

$$z_i = z_j, \ \left[\frac{|x_i - x_j|}{h_x} \right] = 0; \quad \left| \left[\frac{y_i}{h_y} \right] - \left[\frac{y_j}{h_y} \right] \right| \geq 2, \quad \forall i, j \in A^{23}; \tag{7}$$

– размещение оборудования в зонах с естественным освещением

$$\left(y_i \geq y_j, \forall j \in A \setminus A^{24} \right) \vee \left(y_i \leq y_j, \forall j \in A \setminus A^{24} \right), \ \forall i \in A^{24}; \tag{8}$$

– наличие зон, свободных от оборудования:

$$\left\{ (z_i = z_m) \wedge \left(\left| x_i - \tilde{x}_m \right| \geq \frac{a_i + a_m}{2} \vee \left| y_i - \tilde{y}_m \right| \geq \frac{b_i + \tilde{b}_m}{2} \right) \right\} \vee \{ z_i \neq z_m \} \tag{9}$$

и ряда других ограничений: способа установки оборудования (на межэтажное перекрытие или с провисанием), наличия монтажных проемов и грузовых лифтов и т.д.

В качестве критерия задачи PO_M предложен следующий его вид:

$$S^1 = (SK_1^1 + SK_3^1 + SK_4^1 + SK_5^1)\, E_{\text{н}} + SE_3^1. \tag{10}$$

С учетом вышеизложенного, задача размещения оборудования в ангарном (одноэтажном) цехе формулируется так: найти такой вариант размещения технологического оборудования в ангарном цехе $A = A_i(x_i, y_i, z_i, \alpha_i)$, $\forall i = 1, 2, ..., I$ и габариты цеха $S_M = (X_ц, Y_ц, Z_ц)$, при которых критерий (10) достигает минимума и выполняются условия модели (2) – (10).

2. Комбинаторные аналоги метода Гаусса–Зейделя в задаче размещения

Классический вариант

Решим задачу целочисленной оптимизации с целевой функцией $F(x)$, где x – вектор оптимизируемых параметров размещения, а именно перестановка без повторений номеров позиций n элементов. Координаты ячеек для размещения элементов можно вычислить через номер позиции. Подобный подход является экономичным по той причине, что автоматически учитываются геометрические ограничения. В классическом варианте метода Гаусса–Зейделя (покоординатного спуска) поочередно делаются шаги по каждой координате с целью поиска меньшего значения целевой функции. Здесь возможны варианты: можно искать для каждой координаты локальный минимум с той или иной точностью, например, можно ограничиться одним шагом в сторону уменьшения значения функции, а можно искать точное значение координаты локального минимума. Первый подход представляется прагматичным по ряду причин, прежде всего в силу упрощения алгоритма, особенно учитывая целочисленный характер аргументов.

При первом же шаге данной процедуры оптимизации, как правило, происходит выход за пределы допустимой области. В модифицированном комбинаторном варианте метода после такого шага перестановка корректируется: отыскивается аргумент, значение которого совпало с новым значением варьируемой координаты. Значение данного аргумента заменяется на исходное значение (до шага оптимизации) варьируемой координаты. В результате происходит возращение в пространство перестановок без повторений (повтор значений номеров позиций устраняется). Таким образом, в комбинаторном варианте метода покоординатного спуска на одном этапе вычислений меняются одновременно две координаты (а не одна, как в обычном варианте) – по одной из координат делается обычный пробный шаг, а по другой – корректировка, возврат в допустимую область. Далее вычисляется значение целевой функции в найденной точке и сравнивается с достигнутым ранее. Если произошло улучшение значения, то найденная точка становится новой стартовой. Иначе делается шаг по другой координате с одновременной корректировкой вектора номеров позиций элементов (возврат в допустимую область). Как правило, данный метод позволяет найти локальный минимум. Для нахождения глобального оптимума применяют метод так называемого мультистарта. Новая стартовая точка выбирается наиболее просто методом Монте-Карло равновероятно во всей допустимой области.

Рандомизированный комбинаторный аналог метода «быстрой переменной»

Классическая процедура метода Гаусса–Зейделя для рассматриваемой задачи может быть нерациональна по следующей причине. На каждом этапе вычислений осуществляется локальная оптимизация по каждой из n переменных функций цели, в то время как эти вычисления относительно дорогостоящи. Существует рандомизированный вариант метода Гаусса–Зейделя, где переменные, по которым осуществляется локальная оптимизация, выбираются случайно и равновероятно. Но в среднем трудоемкость вычислений здесь имеет аналогичный порядок.

Поэтому рассматриваемые варианты метода Гаусса–Зейделя в данном отношении проигрывают при больших n генетическому алгоритму, для которого требуется число вычислений целевой функции на каждом этапе порядка числа особей в одном поколении m. Аналогично обстоит дело в случае роевого метода, для которого на каждом этапе вычисляется N функций цели, равное размерности роя. Улучшение процедуры метода Гаусса–Зейделя достигается в его варианте, называемом методом быстрой переменной, которая выбирается из условия максимума модуля производных по координатам от функции цели. Однако это требует также n оценок производных. Благоприятным обстоятельством является то, что в задаче о квадратичном назначении быструю переменную можно найти по значениям матрицы связей. Таковые переменные соответствуют элементам, имеющим наибольшее количество связей. То есть оценочный критерий быстрой переменной есть величина, равная матричной норме для матрицы связей **R**, а именно $\max\limits_{i=1,\dots,n}\sum\limits_{j=1}^{n} r_{ij}$. Однако данный критерий является, как было отмечено, оценочным, по этой и другим причинам улучшение вычислительных качеств метода достигается за счет рандомизации. При этом выбор координат для локальной оптимизации осуществляется случайно, но вероятность выбора переменной прямо пропорциональна строчной сумме матрицы связей **R**, а именно $\sum\limits_{j=1}^{n} r_{ij}$, $i = 1,\dots,n$, равной числу связей элемента с остальными элементами цепи.

3. Метод решения задачи размещения на основе генетического алгоритма и парных перестановок

Генетический алгоритм оптимизации является примером применения бионического подхода [10, 14]. Он заключается в следующем.

1. На первом шаге осуществляется задание начальной популяции с определенной численностью.

2. На втором шаге в соответствии с целевой функцией вычисляются коэффициенты выживаемости, их сумма равна единице. Иногда применяются относительные оценки погрешностей и другие критерии.

3. Осуществляется статистическая генерация заданного числа пар для размножения. Вероятность особи попасть в пару определяется коэффициентом выживаемости (значением функции ценности).

4. Проводится скрещивание отобранных пар. Векторы независимых переменных делятся на две части, которыми члены пары обмениваются. В результате потомки со смешанными векторами образуют новую популяцию.

5. Если характеристики потомства плохие, то рационально применение мутации, основанной на рандомизации.

6. Селекция потомства позволяет отобрать особи с наилучшими свойствами выживаемости.

7. Если требуется улучшить найденное решение, то осуществляется переход к шагу 2.

Согласно исследованиям, генетический алгоритм сходится заведомо не хуже метода Монте-Карло. Известны и другие алгоритмы стохастической оптимизации [11, 12].

Проведенное исследование показывает, что метод штрафных функций в задаче размещения и для случая генетического алгоритма является малоэффективным. Поэтому представляет интерес в качестве особей популяции рассматривать

перестановки без повторений. Это обстоятельство учитывается на этапах селекции и мутации: на указанных этапах стандартные вычисления, согласно генетическому алгоритму, дополняются процедурой парных перестановок генов в хромосоме.

Приведем описание программы для реализации на ЭВМ рассматриваемого метода. Вначале осуществляется задание размерностей задачи и матрицы связей элементов r[i, j]. Далее при помощи заданного количества итераций методом Монте-Карло находится m различных перестановок без повторений из чисел 1, …, n – начальное приближение к решению задачи, или первое поколение из m особей. На следующих этапах вычислений осуществляются итерации по методу генетического алгоритма с корректировкой согласно методу парных перестановок (благодаря этому функция штрафа всегда равна нулю, то есть не происходит выход за пределы допустимой области):

1) вычисляются коэффициенты выживаемости для каждой особи и соответствующие вероятности участия в скрещивании;

2) разыгрываются методом Монте-Карло номера m пар особей для скрещивания; вероятности участия в скрещивании пропорциональны коэффициенту выживаемости особи;

3) в результате процедуры скрещивания находятся $2m$ особей – детей. Скрещивание осуществляется согласно следующему правилу. Первый потомок состоит из головной части хромосомы второго родителя длиной в k элементов. Остальные ($n – k$)-генов образуют хвост хромосомы первого потомка и берутся от первого родителя. Второй потомок получается аналогичным образом, но с зеркальной симметрией: он состоит из головной части хромосомы первого родителя длиной в k генов. Остальные ($n – k$)-генов образуют хвост хромосомы второго потомка и берутся от второго родителя;

4) полученные в п. 3 обычной процедурой скрещивания хромосомы $2m$ потомков модифицируются в соответствии с правилами метода парных перестановок, чтобы вернуть соответствующие целочисленные наборы чисел в допустимое множество перестановок без повторений из первых n натуральных чисел. При этом рассматриваются поочередно k первых генов потомка, для каждого отыскивается совпадающий с ним ген его хромосомы. Для исключения дублирования генов вместо найденной копии гена головной части подставляется соответствующий ген из головной части хромосомы его родителя. Данная модификация хромосом является, по сути, своеобразной мутацией потомков, полученных в п. 3.

4. Тестовые примеры вычислений

Генетический алгоритм

Матрица соединений разреженная и задана в виде $r_{ij} = 1, |i - j| = 1$; $r_{ij} = 0, |i - j| \neq 1$; $i, j = 1,...,n$. Шаг ячейки, число шагов по координатам, общее число ячеек и элементов, число особей в одной популяции – соответственно $h = 1$; $n_0 = 6$; $n = 36$; $m = 5$. Каждые два этапа вычислений осуществлялась мутация, наихудший член популяции заменялся на случайный. Начальное размещение показано на рис. 4 ($x_i = i$, $i = 1, …, n$). Соответствующее значение целевой функции $f_{\min} = 120$, при точном $f_{\inf} = 70$.

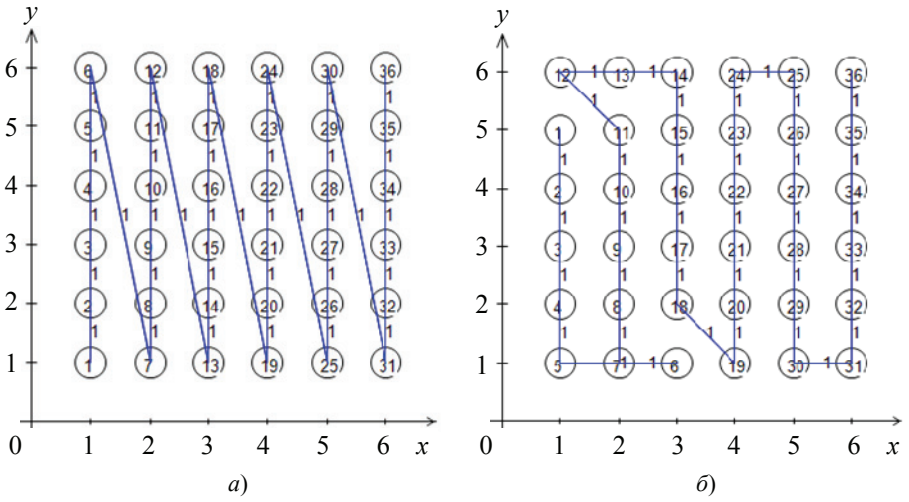


Рис. 4. Метод генетического алгоритма:
а – начальное размещение; *б* – локально оптимальное размещение после 28 790 итераций

Наилучшее приближенное решение после 28 790 итераций $f_{\min} = 76$ (не было улучшено и после 100 000 итераций) (см. рис. 4).

Гибридный метод

«Генетический алгоритм + комбинаторный аналог метода Гаусса–Зейделя». Начальное условие то же, что и в предыдущем пункте (см. рис. 4). Глобальный оптимум достигнут после 59 итерации.

5. Задача оптимального размещения оборудования производства фенил-гамма-кислоты и фенил-и-кислоты

Данная задача – одна из актуальных прикладных задач и решается при следующих допущениях:

1) рассматривается цех, построенный из типовых строительных элементов с шагом сетки колонн кратным 0…6 м (например, 6 м);

2) считается, что в каждой строительной клетке можно поставить только один аппарат (в центре);

3) критерий оптимизации – суммарная длина соединений;

4) габариты цеха тоже фиксированы (например, 6×6 м).

Исходные данные:

а) таблица оборудования (табл. 1).

б) таблица соединений оборудования трубопроводами (табл. 2).

Требуется найти такое расположение объектов на сетке, чтобы критерий (длина соединений) был наименьшим.

Таблица 1

Оборудование производства фенил-гамма-кислоты и фенил-и-кислоты

Номер аппарата	Обозначение на схеме	Название	Размер
1	2	3	4
1	0-108	Парогенератор	5
2	304	Мерник	10

Окончание табл. 1

1	2	3	4
3	301а	Аппарат	25
4	301б		25
5	306а		18
6	306б		
7	311	Фильтр-пресс	10
8	319а	Теплообменник	18
9	319б		
10	0-3	Емкость	16
11	305	Мерник	10
12	0-74	Аппарат	25
13	3м-3а	Бункер	6
14	3м-3б		
15	0-27	Ловушка	6
16	309	Сборник	10
17	0-63	Ловушка	6

Таблица 2

Журнал связей

Номер связи	Аппарат-источник	Аппарат-приемник	Стоимость единицы длины
1	1	2	1
2	2	15	
3	2	3	
4	2	4	
5	3	8	
6	4	9	
7	3	5	
8	4	6	
9	5	7	
10	6	7	
11	7	16	
12	8	9	
13	9	15	
14	10	11	
15	11	3	
16	11	4	
17	11	17	
18	12	13	
19	12	14	
20	13	5	
21	14	6	

Результаты вычислений для случая однократных связей

Всего в цехе имеется 17 аппаратов. Для заполнения поля СК добавляем три фиктивных элемента, без всяких связей и не влияющих поэтому на значение критерия. Суммарное число элементов после этого равно 20, габариты цеха – 6×6 м. Число связей между аппаратами – не более 1.

При вычислениях методом Монте-Карло после 500 000 итераций значение критерия оказалось равным $f_{\inf} = 78$ (рис. 5, *а*).

Для сравнения применены три известных метода получения начального размещения [1], а именно алгоритмы последовательного размещения и размещения по критерию связности, которые дали следующие результаты: $f_{\inf}^{1} = 82$, $f_{\inf}^{2} = 82$, $f_{\inf}^{3} = 76$. Комбинаторный аналог метода Гаусса–Зейделя существенно эффективнее. Наилучшие достигнутые значения локальных минимумов в зависимости от числа итераций (в различных сериях вычислений): $f_{\inf}(50) = 58$, $f_{\inf}(100) = 52$, $f_{\inf}(500) = 56$, $f_{\inf}(1500) = 50$, $f_{\inf}(5000) = 50$. Соответствующие размещения представлены на рис. 6.

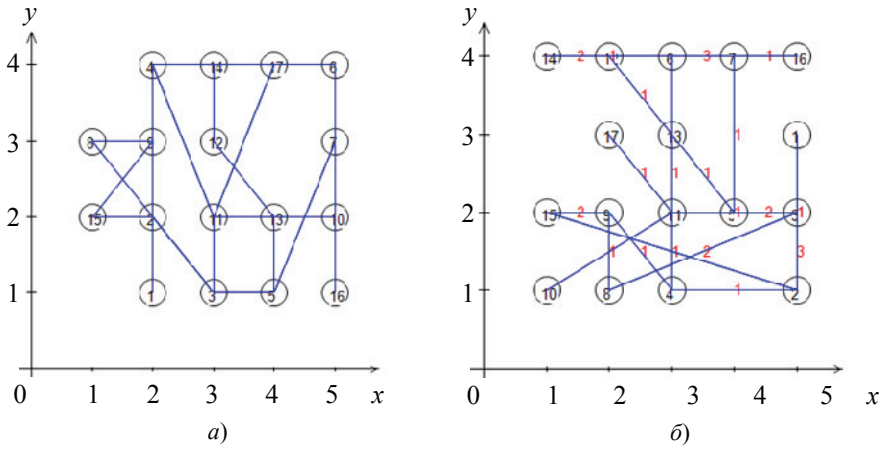


Рис. 5. Размещение оборудования методом Монте-Карло после 500 000 итераций:
а, *б* – соответственно однократные и многократные связи

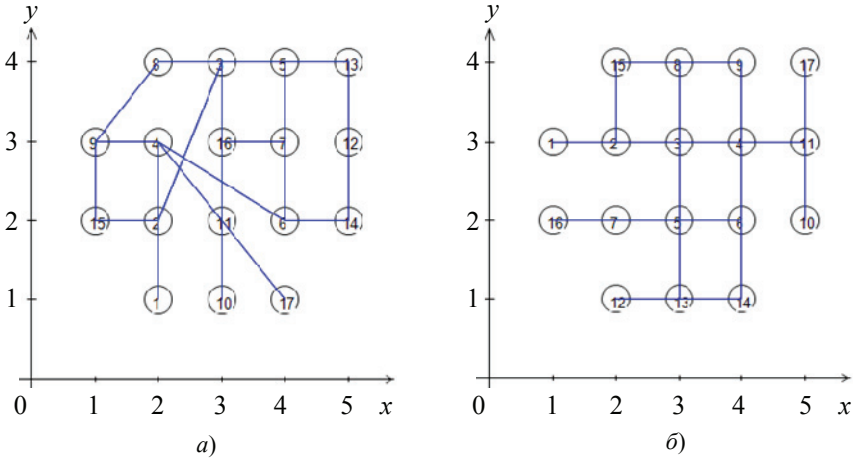


Рис. 6. Метод Гаусса–Зейделя для 50 (*а*), 100 (*б*) итераций (начало)

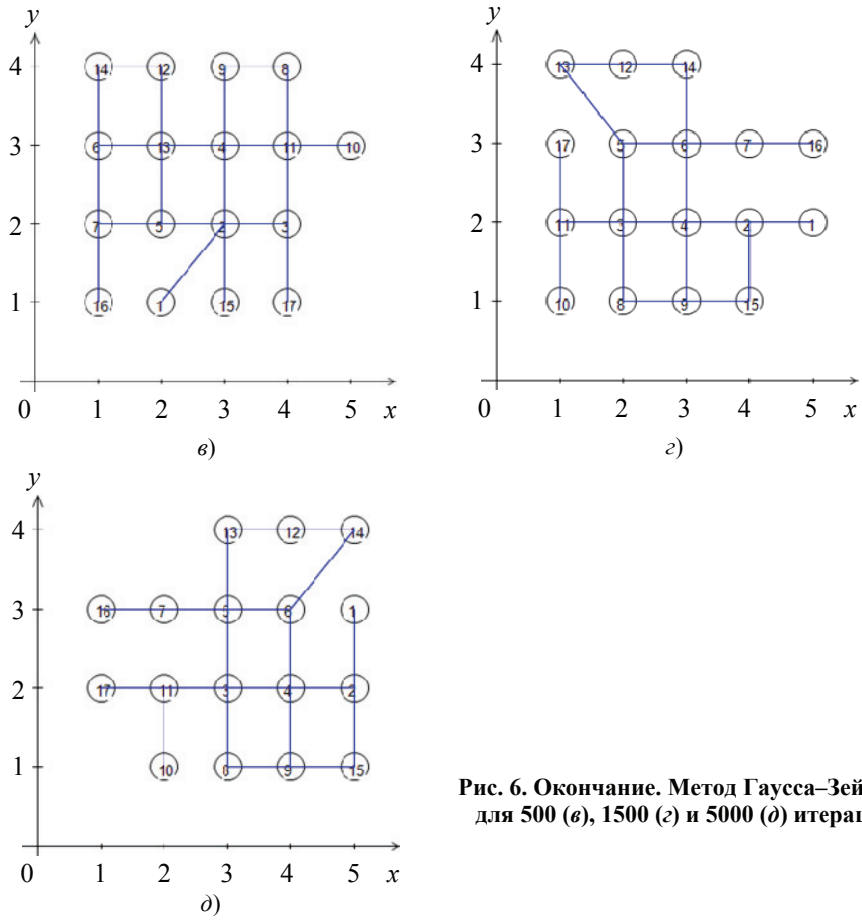


Рис. 6. Окончание. Метод Гаусса–Зейделя для 500 (*в*), 1500 (*г*) и 5000 (*д*) итераций

Результаты вычислений для случая многократных связей

По сравнению с предыдущей задачей количество связей меняется в пределах 1…3. Массив матрицы связей **R**:
r[1, 2] = 3; r[2, 15] = 1; r[2, 3] = 2; r[2, 4] = 1; r[3, 8] = 1; r[4, 9] = 1; r[3, 5] = 2; r[4, 6] = 1; r[5, 7] = 3; r[6, 7] = 1; r[7, 16] = 3; r[8, 9] = 1; r[9, 15] = 2; r[10, 11] = 2; r[11, 3] = 1; r[11, 4] = 3; r[11, 17] = 1; r[12, 13] = 1; r[12, 14] = 2; r[13, 5] = 1; r[14, 6] = 1; r[2, 1] = 1; r[15, 2] = 1; r[3, 2] = 3; r[4, 2] = 1; r[8, 3] = 2; r[9, 4] = 1; r[5, 3] = 2; r[6, 4] = 1; r[7, 5] = 1; r[7, 6] = 3; r[16, 7] = 1; r[9, 8] = 1; r[15, 9] = 2; r[11, 10] = 1; r[3, 11] = 1; r[4, 11] = 2; r[17, 11] = 1; r[13, 12] = 1; r[14, 12] = 2; r[5, 13] = 1; r[6, 14] = 1.

При вычислениях методом Монте-Карло после 500 000 итераций значение критерия равно $f_{\inf} = 113$. Соответствующее размещение показано на рис. 5, *б*.

Для сравнения применены три известных метода получения начального размещения [1], а именно алгоритмы последовательного размещения и размещения по критерию связности, которые дали следующие результаты: $f_{\inf}^{1} = 129$, $f_{\inf}^{2} = 140$, $f_{\inf}^{3} = 111$. Комбинаторный аналог метода Гаусса–Зейделя существенно эффективнее. Наилучшие достигнутые значения локальных минимумов в зависимости от числа итераций (в различных сериях вычислений): $f_{\inf}(50) = 86$, $f_{\inf}(500) = 78$, $f_{\inf}(1500) = 74$. Соответствующие размещения представлены на рис. 7.

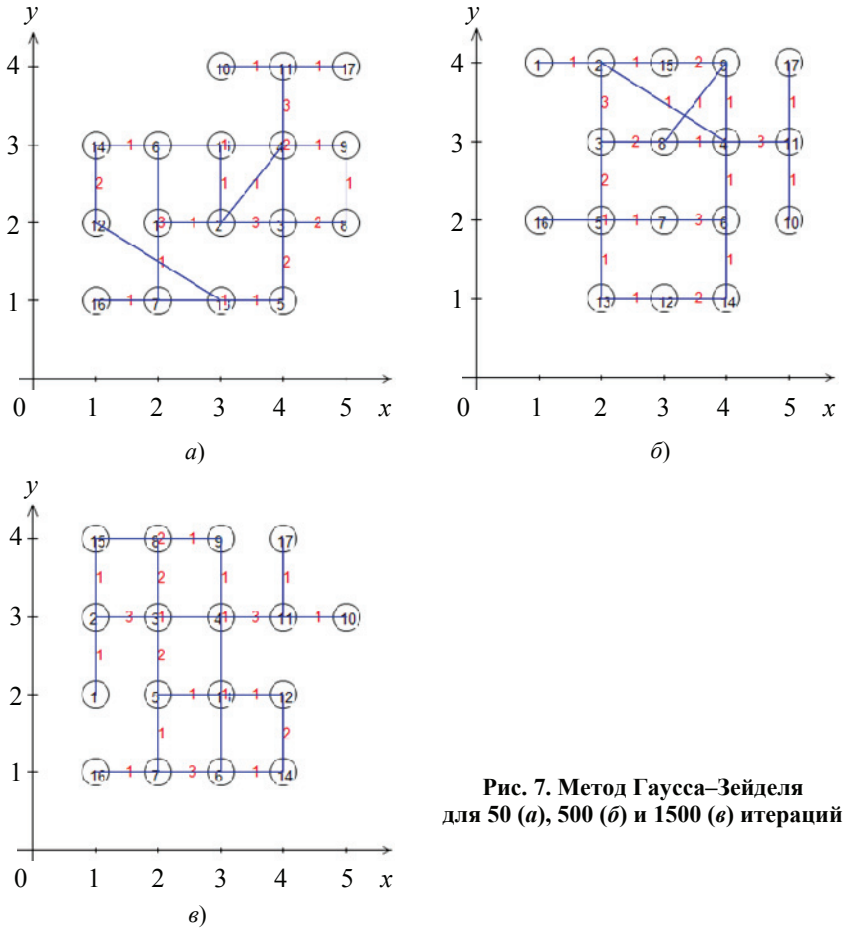


Рис. 7. Метод Гаусса–Зейделя для 50 (*а*), 500 (*б*) и 1500 (*в*) итераций

Выводы

Исследованы и реализованы на ЭВМ метод Монте-Карло, комбинаторные аналоги метода Гаусса–Зейделя, генетического алгоритма и соответствующие гибридные методы, а также известные методы получения начального размещения, а именно алгоритмы последовательного размещения и размещения по критерию связности для решения задачи квадратичного назначения при оптимальном размещении элементов оборудования в цехах предприятий. Проведена серия вычислительных экспериментов на основе процедуры мультистарта, которые показали удовлетворительные вычислительные качества предложенных вариантов методов, а также позволили выявить их достоинства и недостатки. Наилучшими характеристиками обладают метод Гаусса–Зейделя и гибридные аналоги на его основе. Решена актуальная прикладная задача оптимального размещения оборудования производства фенил-гамма-кислоты и фенил-и-кислоты как для однократных, так и многократных соединений аппаратов.

Список литературы

1. Алгоритмы размещения элементов. – Текст : электронный. – URL : https://helpiks.org/8-12562.html (дата обращения: 21.04.2021).

2. Silva, A. Quadratic Assignment Problem Variants: A Survey and an Effective Parallel Memetic Iterated Tabu Search / A. Silva, L. C. Coelho, M. Darvish // European Journal of Operational Research. – 2021. – Vol. 292, No. 3. – P. 1066 – 1084. doi: 10.1016/j.ejor.2020.11.035

3. Николов, Н. П. Размещение элементов электронных узлов методом многоуровневой декомпозиции и макромоделирования и реализация на его основе ППП для САПР РЭА : дис. … канд. техн. наук : 05.13.12 / Николов Николай Пенчев. – Львов, 1985. – 194 с.

4. Горбачев, А. А. Методы и алгоритмы пространственной трассировки печатных плат : дис. … канд. техн. наук : 05.13.12 / Горбачев Андрей Александрович. – Калининград, 1999. – 184 с.

5. Селютин, В. А. Автоматизированное проектирование топологии БИС / В. А. Селютин. – М. : Радио и связь, 1983. – 113 с.

6. Морозов, К. К. Автоматизированное проектирование конструкций радиоэлектронной аппаратуры / К. К. Морозов, В. Г. Одиноков, В. М. Курейчик. – М. : Радио и связь, 1983. – 280 с.

7. Мартюшев, А. В. Метод плетей и границ в квадратичной задаче о назначениях : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.01.09 / Мартюшев Алексей Владимирович. – СПб., 2005. – 100 с.

8. Палубецкис, Г. С. Генератор тестовых задач квадратичного назначения с известным оптимальным решением / Г. С. Палубецкис // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1988. – № 11. – С. 1740 – 1743.

9. Леушкин, А. Д. Квадратичная задача о назначении. Обзор методов, генерация тестовых задач с априорно известным оптимумом / А. Д. Леушкин, Е. А. Неймарк // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – 2020. – № 4 (131). – С. 26 – 34. doi: 10.46960/1816-210X_2020_4_26

10. Старостин, Н. В. Многоуровневый алгоритм решения задачи архитектурно-зависимой декомпозиции : учеб.-метод. пособие / Н. В. Старостин, Н. В. Быкова. – Н. Новгород : Нижегородский госуниверситет, 2017. – 24 с.

11. Рашковский, С. А. Решение задач комбинаторной оптимизации методом Монте-Карло / С. А. Рашковский // Доклады Академии наук. – 2016. – Т. 471, № 4. – С. 403 – 407. doi: 10.7868/S0869565216340065

12. Rashkovskiy, S. A. Monte Carlo Solution of Combinatorial Optimization Problems / S. A. Rashkovskiy // Doklady Mathematics. – 2016. – Vol. 94, No. 3. – P. 720 – 724. doi: 10.1134/S106456241606020X

13. Дарховский, Б. С. Метод пакетных итераций Монте-Карло для решения задач глобальной оптимизации / Б. С. Дарховский, А. Ю. Попков, Ю. С. Попков // Информ. технологии и вычислительные системы. – 2014. – № 3. – С. 39 – 52.

14. Кулаков, А. А. Разработка и исследование алгоритмов оптимального размещения компонентов СБИС трехмерной интеграции : дис. … канд. техн. наук : 05.13.12 / Кулаков Андрей Анатольевич. – Таганрог, 2016. – 164 с.

15. Алгоритм роя частиц. Описание и реализации на языках Python и C#. Канонический алгоритм. – Текст : электронный. – URL : https://jenyay.net/Programming/ParticleSwarm (дата обращения: 21.04.2021).

16. Метаоптимизация роя частиц на основе метода дробного исчисления / И. Г. Дутова, В. А. Мохов, А. В. Кузнецова, В. А. Есаулов // Соврем. проблемы науки и образования. – 2015. – № 2-1. – С. 11 – 13.

17. Автоматизированная информационная система поддержки принятия проектных решений по компоновке промышленных объектов. Часть 1. Аналитические и процедурные модели / С. Я. Егоров, В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов, И. В. Милованов // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2009. – № 4. – С. 3 – 11.

Numerical Methods and Algorithms to Solve the Problem of Quadratic Assignment and Their Application in Space-Planning Industrial Design

V. M. A. Abas[1], S. Ya. Egorov[2]

Department of Applied Mathematics, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI) (1), Novocherkassk, Rostov region, Russia;
Department of Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering, egorovsy@yandex.ru; TSTU (2), Tambov, Russia

Keywords: hangar shop; equipment layout; criteria and optimization methods; metric parameters; placement restrictions; optimization; grid of columns; topological parameters; transport networks.

Abstract: The problem of optimal placement of equipment indoors and the determination of the optimal parameters of transport-pipe-wire networks is considered. A fixed set of apparatus positions and a distance matrix based on an orthogonal metric are given. The Monte Carlo method, combinatorial analogs of the Gauss–Seidel method, the genetic algorithm and the corresponding hybrid methods, as well as known methods for obtaining the initial placement, namely, algorithms for sequential placement and placement according to the connectivity criterion for solving the problem of quadratic assignment with the optimal placement of equipment elements in the shops of enterprises, have been studied and implemented on a computer. A series of computational experiments based on the multistart procedure was carried out; it showed satisfactory computational qualities of the proposed variants of the methods, and also made it possible to identify their advantages and disadvantages. It has been established that the Gauss–Seidel method and hybrid analogues based on it have the best characteristics. The problem from the field of computer-aided design of the most complex and time-consuming stage of designing multi-assortment productions is considered - determining the rational layout of production. The actual applied problem of optimal placement of equipment for the production of phenyl-gamma-acid and phenyl-n-acid for both single and multiple connections of apparatuses has been solved.

References

1. https://helpiks.org/8-12562.html (accessed 21 April 2022).
2. Silva A., Coelho L.C., Darvish M. Quadratic Assignment Problem Variants: A Survey and an Effective Parallel Memetic Iterated Tabu Search, *European Journal of Operational Research*, 2021, vol. 292, no. 3, pp. 1066-1084, doi: 10.1016/j.ejor.2020.11.035
3. Nikolov N.P. *PhD Dissertation* (*Technical*), Lvov, 1985, 194 p. (In Russ.)
4. Gorbachev A.A. *PhD Dissertation* (*Technical*), Kaliningrad, 1999, 184 p. (In Russ.)
5. Selyutin V.A. *Avtomatizirovannoye proyektirovaniye topologii BIS* [Computer-aided design of LSI topology], Moscow: Radio i svyaz', 1983, 113 p. (In Russ.)
6. Morozov K.K., Odinokov V.G., Kureychik V.M. *Avtomatizirovannoye proyektirovaniye konstruktsiy radioelektronnoy apparatury* [Computer-aided design of structures for radio-electronic equipment], Moscow: Radio i svyaz', 1983, 280 p. (In Russ.)
7. Martyushev A.V. *PhD Dissertation* (*Physical and Mathematical*), St. Petersburg, 2005, 100 p. (In Russ.)

8. Palubetskis G.S. [Generator of quadratic assignment test problems with known optimal solution], *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki* [Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics], 1988, no. 11, pp. 1740-1743. (In Russ.)

9. Leushkin A.D., Neymark Ye.A. [Quadratic Assignment Problem. Review of methods, generation of test problems with a priori known optimum], *Trudy NGTU im. R. Ye. Alekseyeva* [Proceedings of NNSTU im. R. E. Alekseeva], 2020, no. 4 (131), pp. 26-34, doi: 10.46960/1816-210X_2020_4_26 (In Russ., abstract in Eng.)

10. Starostin N.V., Bykova N.V. *Mnogourovnevyy algoritm resheniya zadachi arkhitekturno-zavisimoy dekompozitsii: uchebno-metodicheskoye posobiye* [Multilevel algorithm for solving the problem of architecture-dependent decomposition: teaching aid], Nizhniy Novgorod: Nizhegorodskiy gosuniversitet, 2017, 24 p. (In Russ.)

11. Rashkovskiy S.A. [Solving combinatorial optimization problems by the Monte Carlo method], *Doklady Akademii nauk* [Reports of the Academy of Sciences], 2016, vol. 471, no. 4, pp. 403-407, doi: 10.7868/S0869565216340065 (In Russ.)

12. Rashkovskiy S.A. Monte Carlo Solution of Combinatorial Optimization Problems, *Doklady Mathematics*, 2016, vol. 94, no. 3, pp. 720-724, doi: 10.1134/S106456241606020X

13. Darkhovskiy B.S., Popkov A.Yu., Popkov Yu.S. [The Monte Carlo batch iteration method for solving global optimization problems], *Informatsionnyye tekhnologii i vychislitel'nyye sistemy* [Information Technologies and Computing Systems], 2014, no. 3, pp. 39-52. (In Russ.)

14. Kulakov A.A. *PhD Dissertation* (*Technical*), Taganrog, 2016, 164 p. (In Russ.)

15. https://jenyay.net/Programming/ParticleSwarm (accessed 21 April 2022).

16. Dutova I.G., Mokhov V.A., Kuznetsova A.V., Yesaulov V.A. [Meta-optimization of a swarm of particles based on the method of fractional calculus], *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2015, no. 2-1, pp. 11-13. (In Russ., abstract in Eng.)

17. Yegorov S.Ya., Mokrozub V.G., Nemtinov V.A., Milovanov I.V. [Automated information system for supporting the adoption of design decisions on the layout of industrial facilities. Part 1. Analytical and procedural models], *Informatsionnyye tekhnologii v proyektirovanii i proizvodstve* [Information technologies in design and production], 2009, no. 4, pp. 3-11. (In Russ., abstract in Eng.)

Numerische Methoden und Algorithmen zur Lösung der Aufgabe der quadratischen Bestimmung und ihre Anwendung bei der Volumenplanung der Produktion

Zusammenfassung: Es ist das Problem der optimalen Platzierung von Geräten in Innenräumen und die Bestimmung der optimalen Parameter von Transport-Rohrleitungsnetzen betrachtet. Ein fester Satz von Fahrzeugpositionen und eine Abstandsmatrix basierend auf einer orthogonalen Metrik sind gegeben. Das Monte-Carlo-Verfahren, kombinatorische Analoga des Gauss-Seidel-Verfahrens, der genetische Algorithmus und die entsprechenden Hybridverfahren sowie bekannte Verfahren zum Erhalten der anfänglichen Platzierung, nämlich Algorithmen zur sequentiellen Platzierung und Platzierung nach dem Verbindungskriterium zur Lösung des Problems der quadratischen Zuordnung mit optimaler Platzierung, sind am Computer untersucht, und Ausstattungselemente sind in Werkstätten von Unternehmen implementiert. Es ist eine Reihe von rechnerischen Experimenten auf Basis des Multistart-Verfahrens durchgeführt, die zufriedenstellende rechnerische Qualitäten der vorgeschlagenen Verfahrensvarianten zeigten und es auch ermöglichten, ihre Vor- und

Nachteile zu identifizieren. Es ist festgestellt, dass die Gauß-Seidel-Methode und darauf basierende Hybridanaloga die besten Eigenschaften aufweisen. Es ist das Problem aus dem Bereich des computergestützten Designs des komplexesten und zeitaufwändigsten Schrittes bei der Gestaltung von Mehrsortimentsproduktionen betrachtet - die Bestimmung des rationellen Layouts der Produktion. Das aktuell angewandte Problem der optimalen Platzierung von Anlagen zur Herstellung von Phenyl-Gamma-Säure und Phenyl-N-Säure sowohl für Einzel- als auch für Mehrfachverbindungen von Apparaten ist gelöst.

Méthodes numériques et algorithmes de la résolution du problème de la destination quadratique et leur application lors de la planification de la conception volumétrique de la production

Résumé: Est examiné le problème du placement optimal de l'équipement à l'intérieur des locaux et de la détermination des paramètres optimaux des réseaux de transport et de pipelines. Sont donnés l'ensemble fixe des positions de l'appareils et une matrice des distances basée sur une métrique orthogonale. Sont étudiés et mis en œuvre sur ordinateur la méthode Monte-Carlo, les analogues combinatoires de la méthode Gauss-Seidel, l'algorithme génétique et les méthodes hybrides correspondantes ainsi que les méthodes connues pour obtenir le placement initial, à savoir les algorythmes de placement séquentiel et de placement selon le critère de connectivité pour résoudre le problème de la destination quadratique avec le placement optimal des éléments de l'équipement dans les ateliers des entreprises. Est réalisée une série d'expériences de calcul à la base de la procédure multistart, qui ont montré les qualités de calcul satisfaisantes des variantes de méthodes proposées, ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients. Est établi que les meilleures caractéristiques donnent la méthode de Gauss–Seidel et les analogues hybrides. Est examinée la tâche du domaine de la conception assistée par ordinateur de l'étape la plus complexe et la plus laborieuse de la conception des productions multigammes, celle de la détermination de la disposition rationnelle de la production. Est résolu le problème d'application actuel de l'emplacement optimal de l'équipement pour les composés simples et multiples des appareils.

Авторы: ***Абас Висам Махди Абас*** – аспирант кафедры прикладной математики, ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова», Новочеркасск, Ростовская обл., Россия; ***Егоров Сергей Яковлевич*** – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

УДК 004.946
DOI: 10.17277/vestnik.2022.03.pp.428-443

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДЛЯ ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ

А. Е. Архипов, С. В. Карпушкин

Кафедра «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», alexeiarh@gmail.com; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия

Ключевые слова: корреляционные матрицы; система визуализации; структурно-параметрический синтез; тренажерный комплекс.

Аннотация: Предложена методика синтеза систем визуализации (СВ) тренажерных комплексов (ТК) для отраслей промышленности, где невозможно обучение на реально действующих объектах. Методика включает модели описания и оценки эффективности СВ, постановку задачи структурно-параметрического синтеза СВ ТК, алгоритм оценки компонентов визуализации, основанный на ранжировании компонентов СВ с применением корреляционных матриц. Приведен пример практического применения разработанной методики для проектирования СВ ТК профессиональной подготовки шахтеров к деятельности в штатных и аварийных ситуациях.

Введение

Тренажерная подготовка наиболее востребована и получила ускоренное развитие при подготовке к деятельности в отраслях с высокими рисками, где особенно велика значимость человеческого фактора и невозможно обучение на реально действующих объектах: в оборонном комплексе, при работе по ликвидации чрезвычайных ситуаций, в медицине и энергетике.

Требования к параметрам систем визуализации (**СВ**) в каждой из этих областей применения тренажеров могут значительно отличаться. В ряде отраслей точность воспроизведения реальных процессов должна быть максимальной, что предъявляет высокие требования к аппаратному и программному обеспечению, и, как следствие, повышает стоимость СВ. В иных отраслях, напротив, даже низкокачественная и упрощенная имитация процессов, происходящих в технической системе, позволит обеспечить требуемый уровень подготовки специалистов с минимальными издержками.

Вопросы выбора технологий и средств визуализации рассматривались в работах [1, 2], однако единая универсальная классификация средств и технологий визуализации для тренажерных комплексов (**ТК**) не сформулирована, отсутствует теоретическое обоснование выбора компонентов СВ, учитывающее критерии качества освоения профессионально важных компетенций и стоимости системы.

Специфике разработки СВ ТК посвящены публикации [3, 4]. В результате их анализа установлено, что каждая предметная область обладает своей спецификой, оказывающей непосредственное влияние на структуру ТК и его функционирование. Задачи синтеза структуры СВ решаются с применением экспертных оценок,

что приводит к высокой субъективности получаемых результатов и, следовательно, не обеспечивают оптимальности итогового решения с учетом качественно-стоимостных характеристик.

Целью настоящей работы является повышение экономической эффективности и качества подготовки специалистов эргатических систем к выполнению профессиональных задач с применением ТК за счет выбора оптимальной структуры и параметров СВ. Для этого необходимо формализовать процесс профессиональной подготовки на ТК, разработать модель описания и оценки эффективности, алгоритм структурно-параметрического синтеза СВ ТК, то есть выбора ее оптимальной конфигурации.

Модель описания и оценки эффективности системы визуализации тренажерного комплекса

Предлагаемая модель описания и оценки эффективности СВ ТК представляет собой кортеж

$$M_{VS}(TS, P) = \langle HW_{VS}, SW_{VS}, R\rangle, \tag{1}$$

где TS – техническая система, процессы которой реализуются в ТК; P – модель деятельности специалистов при использовании тренажерного комплекса; $HW_{VS} = \{hm_{VSi}\} \subset HW$ – множество аппаратных компонентов, используемых в системе визуализации ТК из множества аппаратных компонентов HW; $SW_{VS} = \{sm_{VSi}\} \subset SW$ – множество программных компонентов, используемых в системе визуализации ТК из множества программных компонентов SW; $\{hm_{VSi}\}$, $\{sm_{VSi}\}$ – аппаратная часть и программное обеспечение i-го компонента СВ; $R = \langle R_S, R_T, R_C, R_{TT}, R_{QT}\rangle$ – совокупность критериев оценки эффективности СВ ТК; $R_S = \{R_{Si}\}$, $R_T = \{R_{Ti}\}$; $R_C = \{R_{Ci}\}$; $R_{TT} = \{R_{TTi}\}$, $R_{QT} = \{R_{QTi}\}$ – оценки компонентов СВ: соответственно стоимость и продолжительность разработки; стоимость эксплуатации; продолжительность и качество подготовки.

Структура системы визуализации S_{VS} определяет набор программных и аппаратных компонентов (модулей m_k), используемых при ее реализации:

$$S_{VS} \subseteq HW_{VS} \times SW_{VS},\ S_{VS} = \{m_k\} \subseteq \{hm_{VSi}\} \cup \{sm_{VSi}\}. \tag{2}$$

При этом структура S_{VS} определяет лишь категории используемых компонентов, например, шлем VR (виртуальной реальности), монитор, контроллеры, виртуальная сцена с набором трехмерных объектов.

Значения параметров системы визуализации $P_{VS} = \{p_{VSi}\}$ определяют выбор конкретных моделей аппаратных компонентов $MHW_{VS} = \{mhm_{VSi}\}$ и настройки программных модулей $MSW_{VS} = \{msm_{VSi}\}$:

$$\begin{aligned} &HW_{VS} \underset{P_{VS}}{\rightarrow} MHW_{VS};\\ &SW_{VS} \underset{P_{VS}}{\rightarrow} SHW_{VS}. \end{aligned} \tag{3}$$

Каждому конечному программному компоненту msm_{VSi} или аппаратному компоненту mhm_{VSi} СВ соответствует оценка, определяющая его качественные и количественные характеристики:

$$rhm_{VSi} = \langle R_{HWi}, R_{Si}, R_{Ti}, R_{Ci}, R_{TTi}, R_{QTi}\rangle,\ rsm_{VSi} = \langle R_{SWi}, R_{Si}, R_{Ti}, R_{Ci}, R_{TTi}, R_{QTi}\rangle, \tag{4}$$

где R_{HWi} – множество характеристик аппаратного компонента mhm_{VSi}, включающее его потребительские свойства (разрешение экрана, вес, стоимость, размеры);

R_{SWi} – множество характеристик программного компонента msm_{VSi}, включающее его потребительские свойства (объем занимаемой памяти, требования к вычислительной мощности, используемые библиотеки программного кода, язык программирования).

Стоимость разработки программного обеспечения i-го компонента СВ рассчитывается по формуле

$$R_{Si} = (sd_i + sa_i), \tag{5}$$

где sd_i, sa_i – стоимости разработки соответственно программного обеспечения компонента и дополнительного программного обеспечения для обеспечения взаимосвязанной работоспособности других элементов системы визуализации (для расчета применяется методика COCOMO II [5, 6]).

Продолжительность разработки программного обеспечения i-го компонента СВ рассчитывается по формуле

$$R_{Ti} = (td_i + ta_i), \tag{6}$$

где td_i, ta_i – продолжительности разработки соответственно системы и дополнительного программного обеспечения для обеспечения взаимосвязанной работоспособности других элементов системы визуализации (по методике COCOMO II).

Стоимость эксплуатации i-го компонента СВ можно найти по формуле

$$R_{Ci} = S_f + S_p + S_a + S_e + S_r + S_{em} + S_{oh}, \tag{7}$$

где S_f – затраты на покупку и доставку компонента; S_p – зарплата обслуживающего персонала ТК; S_a – амортизационные отчисления; S_e – затраты на потребляемые энергоресурсы; S_r – затраты на ремонт или восстановление; S_{em} – затраты на приобретение расходных материалов; S_{oh} – накладные расходы.

Продолжительность R_{TTi} освоения i-го компонента СВ определяется в результате экстраполяции эмпирических оценок предыдущих испытаний на аналогичных ТК

$$R_{TTi} = \frac{1}{nP}\sum_{j=1}^{nP} tt_j(v_i), \tag{8}$$

где $tt_j(v_i)$ – общее время освоения v_i-компонента j-м специалистом, $v_i = mhm_{VSi} \vee msm_{VSi}$; nP – общее количество специалистов.

Качество R_{QTi} освоения i-го компонента СВ зависит от успешности выполнения тренировочных заданий на некотором множестве аналогичных ТК с типовым набором компонентов СВ

$$R_{QTi} = \frac{1}{nPnK}\sum_{j=1}^{nP}\sum_{k=1}^{nK}\frac{vp_{jk}(v_i)}{v_{jk}}, \tag{9}$$

где $vp_{jk}(v_i)$ – количество выполненных заданий с использованием компонента v_i в рамках проверки освоения k-й компетенции; v_{jk} – полный объем заданий в рамках проверки освоения k-й компетенции; nK – количество анализируемых компетенций.

Задача структурно-параметрического синтеза СВ ТК формулируется следующим образом: определить такое множество элементов структуры $S^*_{VS} \subseteq S_{VS}$ и параметров $P^*_{VS} \subseteq P_{VS}$ аппаратных и программных модулей СВ ТК, при которых оценки системы визуализации достигают экстремальных значений, а именно:

стоимость и продолжительность разработки, а также стоимость эксплуатации и продолжительность подготовки стремятся к минимуму, а качество подготовки – к максимуму:

$$\left\{S_{VS}^{*}, P_{VS}^{*}\right\} = \begin{cases} \underset{S_{VS}, P_{VS}}{\arg\min}\left(R_S\right) \\ \underset{S_{VS}, P_{VS}}{\arg\min}\left(R_T\right) \\ \underset{S_{VS}, P_{VS}}{\arg\min}\left(R_C\right) \\ \underset{S_{VS}, P_{VS}}{\arg\min}\left(R_{TT}\right) \\ \underset{S_{VS}, P_{VS}}{\arg\max}\left(R_{QT}\right) \end{cases} \quad (10)$$

при выполнении соотношений (2) – (9) модели описания и оценки эффективности СВ и следующих ограничений:

– на соответствие осваиваемых компетенций PK требуемым PK^*

$$PK \subset PK^*; \quad (11)$$

– экономические ресурсы:

$$R_S + R_C \le E^*; \quad (12)$$

– продолжительность освоения:

$$R_{TT} \le t_{TR}; \quad (13)$$

– совместимость выбранных программных и аппаратных модулей,

где PK^* – набор необходимых компетенций; E^* – максимально допустимые затраты на реализацию и обслуживание системы визуализации; t_{TR} – максимально возможная продолжительность их освоения.

Методика синтеза системы визуализации тренажерного комплекса

Предлагаемая методика синтеза СВ ТК, представленная на рис. 1 в виде функциональной диаграммы в нотации IDEF0, включает следующие этапы:

А1. Анализ процессов технической системы. В ходе данного этапа формируется формализованное представление объектов, субъектов и процессов, протекающих в целевой предметной области в виде модели описания технической системы.

А2. Формирование модели деятельности специалистов в результате формализации правил, алгоритмов действия специалистов, для которых разрабатывается ТК.

А3. Постановка задачи структурно-параметрического синтеза системы визуализации. На основе технического задания и формализованных моделей ставится задача (10), (2) – (9), (10) – (13) для определенной технической системы с указанием набора входных переменных и интервалов их допустимых значений.

А4. Определение набора компонентов системы визуализации.

А5. Определение оптимальных параметров компонентов системы визуализации: параметрический синтез, в ходе которого для каждого выбранного компонента проводится его уточнение по двум направлениям: определению конкретной модели аппаратного компонента; выбору конкретных параметров программного компонента, которые осуществляются в результате полного перебора допустимых вариантов.

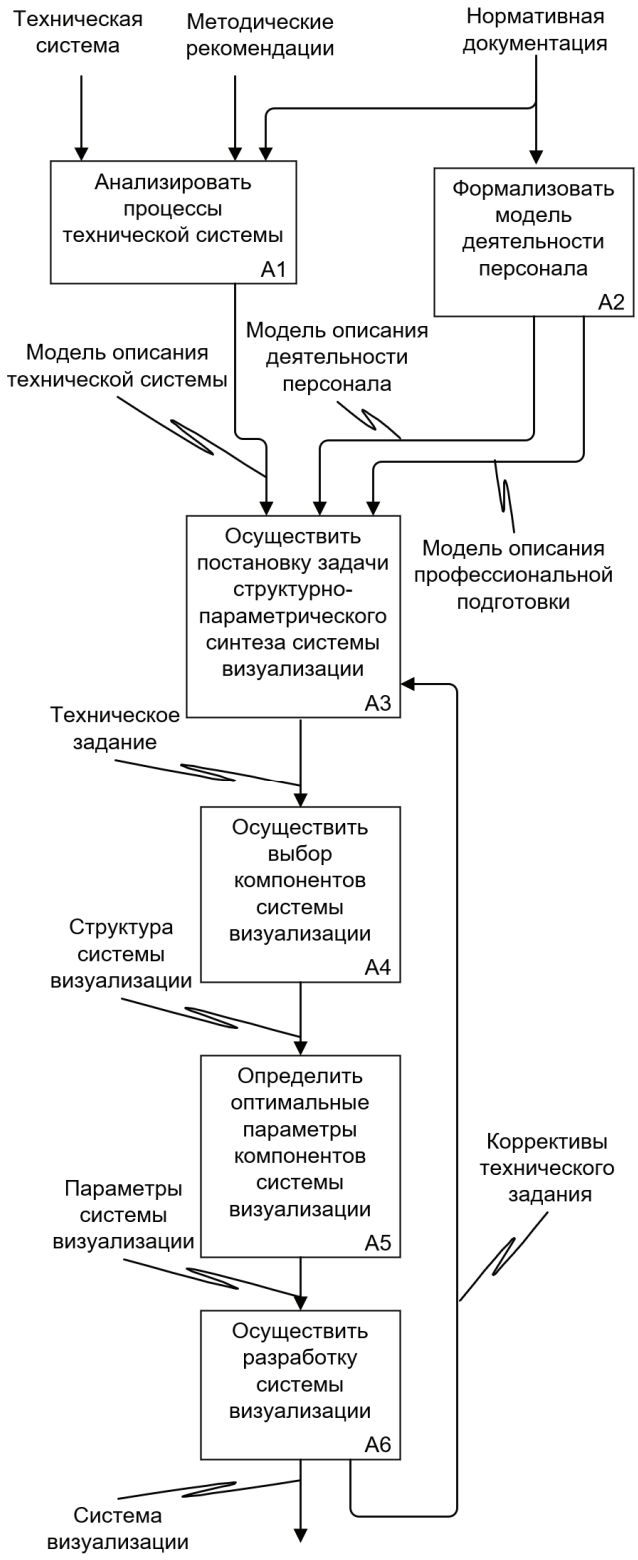


Рис. 1. Методика структурно-параметрического синтеза СВ ТК

А6. Разработка системы визуализации. На основе сформированных моделей деятельности специалистов, процесса профессиональной подготовки, выбранной структуры и параметров системы визуализации осуществляется программно-аппаратная реализация системы визуализации.

Ключевым этапом представленной методики является определение набора компонентов визуализации согласно алгоритму, основанному на использовании корреляционных матриц оценки качества компонентов по различным метрикам.

Выделяется 14 метрик оценки качества компонентов визуализации, полученных на основе анализа классификации средств и технологий визуализации: 1) точность восприятия размеров 3D-объектов; 2) точность восприятия расстояний; 3) уровень погружения, объемность визуализации; 4) работа с высокополигональными сценами; 5) возможность высокочастотной отрисовки отображения; 6) точность взаимодействия с «крупными» объектами; 7) точность взаимодействия с «мелкими» объектами; 8) реалистичность взаимодействия; 9) точность перемещения; 10) реалистичность перемещения; 11) точность позиционирования; 12) свойства звукоизоляции; 13) объемность звучания; 14) реалистичность звучания.

Метрики распределены по четырем категориям:

1. Отображение (метрики 1 – 5) – технические возможности отображения различной графической информации.

2. Взаимодействие (метрики 6 – 8) – оценка возможности и достоверности взаимодействий с объектами в виртуальном пространстве.

3. Перемещение (метрики 9 – 11) – уровень возможности перемещения графического представления специалиста (виртуального аватара) в виртуальном пространстве.

4. Звук (метрики 12 – 14) – качество звукового сопровождения.

Формируются основные категории компонентов СВ, соответствующие категориям метрик:

1. Отображение – проектор, смартфон, шлем VR, очки AR (дополненной реальности), очки MR (смешанной реальности).

2. Взаимодействие – клавиатура и мышь, «игровые» контроллеры, контроллеры VR/AR/MR, система отслеживания движений, имитатор специализированного инструмента.

3. Перемещение – клавиатура и мышь, «игровые» контроллеры, контроллеры VR/AR/MR, система отслеживания движений, VR-платформы, уникальная система создания физических нагрузок.

4. Звук – одноканальная система, системы объемного звучания, наушники, системы специализированных сигналов (сирены).

Выявляются различия между компонентами каждой из категорий путем разработки тренажеров с набором типовых компонентов и их применения для сравнения эффективности реализации различных метрик конкретной категории по результатам тестирования фокус-группой пользователей. На основе собранных оценок компонентов фокус-группой осуществляется построение корреляционных матриц где строки соответствуют компонентам СВ, а столбцы – метрикам оценки их качества. Так как компоненты распределены по четырем категориям в соответствии с группами метрик, то формируются четыре матрицы, каждая из которых иллюстрирует степень применимости компонента (от 0 до 10) по каждой метрике. Очевидно, что для формирования оптимальной структуры СВ, с учетом требований технического задания к компонентам, необходимо выбирать те, которым соответствуют максимальные оценки. Полученные корреляционные матрицы представлены в табл. 1 – 4.

Как видно, метрики отражения наилучшим образом реализует шлем VR, метрики взаимодействия – имитатор специального инструмента, метрики перемещения – система создания физических нагрузок, метрики звукового сопровождения – системы специальных сигналов.

Таблица 1

Оценки метрик отображения

Метрика	1	2	3	4	5	Итог
Монитор	5	2	8	10	9	6,8
Проектор	6	3	7	10	5	6,2
Смартфон	3	1	5	3	7	3,8
Шлем VR	8	9	10	8	10	9
Очки AR	1	0	2	2	7	2,4
Очки MR	10	10	8	3	6	7,4

Таблица 2

Оценки метрик взаимодействия

Метрика	6	7	8	Итог
Клавиатура и мышь	4	2	2	2,67
«Игровые» контроллеры	5	3	5	4,33
Контроллеры VR, AR, MR	6	4	6	5,33
Система отслеживания движений	9	8	8	8,33
Имитатор специального инструмента	8	10	10	9,33

Таблица 3

Оценки метрик перемещения

Метрика	9	10	11	Итог
Клавиатура и мышь	2	1	3	2
«Игровые» контроллеры	3	2	5	3,3
Контроллеры VR, AR, MR	4	3	8	5
Система отслеживания движений	9	10	10	9,67
VR-платформы	8	8	9	8,34
Система создания физических нагрузок	10	10	10	10

Таблица 4

Оценки метрик звукового сопровождения

Метрика	12	13	14	Итог
Одноканальная система	2	1	3	2
Системы объемного звучания	9	10	9	9,3
Наушники	10	10	8	9,3
Системы специальных сигналов	10	10	10	10

Практическое применение методики

Рассмотрим применение разработанной методики структурно-параметрического синтеза СВ ТК профессиональной подготовки шахтеров к деятельности в штатных и аварийных ситуациях. Спроектированная СВ должна быть адаптирована ко всем аспектам деятельности обучающихся в различных режимах работы, а также в чрезвычайных ситуациях.

На этапе А1 формируется модель описания шахты, в которую входит формализованное представление основных объектов шахты и процессов их взаимодействия. К числу основных объектов отнесены: огнетушитель, шкаф, вагонетка, телефон, дверь, распределительный щит. Возможные действия оператора над ними: взятие предмета, его перемещение, взаимодействие с ним и т.д.

На этапе А2 формализована модель деятельности персонала, включающая следующие операции: обнаружение источника пожара, перемещение к телефону, взятие трубки, оповещение о чрезвычайной ситуации, перемещение к шкафам с огнетушителями, открытие шкафа, взятие огнетушителя в руки, перемещение к источнику пожара на безопасное расстояние, тушение пожара до его полной ликвидации, утилизация огнетушителя, оповещение об успешном устранении пожара по телефону.

На этом же этапе формируется набор компетенций, которые необходимо сформировать у обучающихся:

$$PK^{*} = (pk_1, pk_2, pk_3), \tag{14}$$

где pk_1 – умение проводить комплексный анализ внутренней и внешней среды деятельности, адекватно оценивать свои возможности и планировать оптимальное использование имеющихся ресурсов в сложившейся ситуации; pk_2 – психологическая устойчивость к стрессу, способность преодолевать психологическую инерцию при деятельности в чрезвычайных ситуациях; pk_3 – знание производственного регламента, ПЛАС, нормативной документации о правилах деятельности в штатных и аварийных ситуациях.

Задан набор задач подготовки

$$Z = (z_1, z_2, z_3), \tag{15}$$

включающий следующие действия пользователя в виртуальной реальности:

z_1 – оповещение о чрезвычайной ситуации, направлена на формирование компетенции pk_1, уровень сложности $DIFF(z_1)$ – высокий;

z_2 – тушение возгорания, направлена на формирование компетенции pk_2, уровень сложности $DIFF(z_2)$ – высокий;

z_3 – эвакуация в безопасное место, направлена на формирование компетенции pk_3, уровень сложности $DIFF(z_3)$ – средний.

В ходе анализа технического задания на этапе А3 сформулированы граничные условия, сведенные в табл. 5.

В качестве целевой функции решено использовать общую стоимость затрат на реализацию системы визуализации, то есть сумму затрат на разработку СВ R_S и стоимость ее эксплуатации R_C. Остальные критерии из (10) используются как ограничения, то есть задача структурно-параметрического синтеза СВ ТК для подготовки шахтеров сформулирована следующим образом:

Необходимо определить такое множество элементов структуры S_{VS} системы визуализации АТК и соответствующее ему множество параметров P_{VS} аппаратных и программных модулей системы визуализации, при которых целевая функция

$$R_S + R_C \to \min \tag{20}$$

Таблица 5

Граничные условия синтеза СВ ТК подготовки шахтеров

Наименование ограничения	Значение
Максимальное время R_T разработки программного обеспечения СВ	8 человеко-месяцев
Максимальные затраты на разработку R_S СВ и стоимость ее эксплуатации R_C	1 500 000 р.
Минимальное качество обучения R_{QT}	0,8
Максимальное время обучения R_{TT}	30 часов
Необходимость обучения во внештатных/аварийных ситуаций	Требуется
Необходимость перемещения оператора	С помощью контроллеров или иных средств имитации перемещения
Необходимость обеспечения совместной работы	Требуется
Требования к функциональным особенностям	Реализация шахты и пользователей; звуковое сопровождение событий; имитация физических процессов окружающего мира горения, тушения, задымления, затопления; взаимодействие пользователя с оборудованием и огнетушителем
Область применения	Горнодобывающая промышленность
Возможность замены реальных объектов виртуальными	Требуется

при выполнении ограничений:

$$R_T \leq 8; \tag{21}$$

$$R_{TN} \leq 30; \tag{22}$$

$$R_{QT} \geq 0{,}8; \tag{23}$$

$$R_S + R_C \leq 1\ 500\ 000; \tag{24}$$

$$PK = (pk_1, pk_2, pk_3), \tag{25}$$

а также соответствие между выбранными программными и аппаратными модулями.

Далее в соответствии с этапом А4 осуществлен структурный синтез СВ с применением корреляционных матриц (см. табл. 1 – 4).

Методом перебора получены результаты, представленные в табл. 6. Выбрано три варианта компоновки тренажера. Первый вариант – максимальный, основанный на максимальных оценках по отображению, взаимодействию и перемещению, включая беговую платформу для имитации физических нагрузок; второй (оптимальный) – является сбалансированным, так как ориентирован на использование максимальных по качеству средств отображения и взаимодействия, но не использует дорогостоящий компонент перемещения; третий (минимальный) – основан на использовании монитора, клавиатуры и мыши, что значительно снижает стоимость решения.

Таблица 6

Оценка компонентов СВ ТК подготовки шахтеров

Вариант системы визуализации	Отображение	Взаимодействие	Перемещение	Звуковое сопровождение	Итог
Максимальный (шлем и контроллеры VR; система создания физических нагрузок; наушники)	9,00	5,33	10,00	9,50	33,83
Оптимальный (шлем и контроллеры VR; наушники)	9,00	5,33	5,00	9,50	28,83
Минимальный (монитор; клавиатура и мышь; одноканальная система)	6,80	2,67	2,00	3,00	14,47

Для окончательного выбора структуры СВ на этапе А5 реализован параметрический синтез для трех выбранных вариантов структуры СВ. Размерность задачи параметрического синтеза определяется количеством входных переменных (параметров компонентов СВ) и областью их изменения:

– отображения: 5 моделей шлемов VR, 5 моделей мониторов;

– взаимодействия: 2 модели контроллеров, 2 модели комплектов клавиатура + мышь;

– перемещения: 2 модели контроллеров, 2 модели комплектов клавиатура + мышь, 1 модель системы создания физических нагрузок;

– звукового сопровождения: 5 моделей наушников, 5 моделей одноканальных систем;

– детализации сцены: 10 вариантов с различными уровнем детализации, количеством полигонов, качеством текстур.

В качестве программной платформы для разработки СВ из двух возможных вариантов (Unity [7] и Unreal Engine [8]) в результате сравнения по методу COCOMO II выбрана платформа Unity, как обеспечивающая меньшую стоимость разработки (600 тыс. р. против 870 тыс. р.).

Исходя из требований технического задания к высокой степени детализации сцен виртуальной реальности, в качестве приоритетных выбраны варианты детализации от 7-го (216 тыс. р.) до 10-го (277 тыс. р.).

Таким образом, в ходе параметрического синтеза с учетом ограничений на совместимость компонентов необходимо осуществить расчет метрик для 400 вариантов СВ: рассчитать общую стоимость и продолжительность разработки с использованием выбранных программных средств и аппаратного обеспечения. Минимальные затраты на аппаратное обеспечение трех выбранных вариантов структуры СВ представлены в табл. 7. Максимальная конфигурация из-за высокой стоимости оборудования, особенно системы создания физических нагрузок, не позволяет выполнить ограничения на стоимость разработки СВ. Итоговые затраты для оптимальной и минимальной конфигураций представлены в табл. 8.

Таблица 7

Минимальные затраты на аппаратное обеспечение трех выбранных конфигураций СВ

Компонент визуализации	Стоимость, р.
Максимальная	
Шлем VR HTC Vive Pro Eye	140 000
Перчатки VR Manus Prime One	381 000
Система создания физических нагрузок	3 000 000
Наушники (встроены в систему HTC Vive Pro Eye)	0
Высокопроизводительный компьютер ПК (Intel i9 12900, Nvidia RTX 3070, 1024 Гб ССД, 32 Гб ОЗУ)	300 000
Итого	3 820 000
Оптимальная	
Шлем VRoculus quest 2	50 000
Контроллеры (Встроены в систему oculusquest 2)	0
Наушники (Встроены в систему oculusquest 2)	0
Компьютер с поддержкой VR (AMD Ryzen 5600x, Nvidia RTX 3050 ti, 512 Гб ССД, 16 Гб ОЗУ)	170 000
Итого	220 000
Минимальная	
Монитор	20 000
Клавиатура и мышь	3000
Одноканальная звуковая система	1000
Персональный компьютер с видеокартой (AMD Ryzen 3500, Nvidia RTX 3050, 256 Гб ССД, 8 Гб ОЗУ)	100 000
Итого	124 000

Таблица 8

Сравнение оптимальной и минимальной конфигурации СВ

Показатель	Конфигурация СВ	
	оптимальная	минимальная
Затраты, р.: на разработку (основные)	598 157,00	
детализацию сцен VR	277 000,00	216 000,00
эксплуатацию	220 000,00	124 000,00
итоговые	1 095 157,00	838 157,00
Оценка качества компонентов	28,83	14,47
Срок разработки, человеко-месяцев	7,3	6,7

Так как оба варианта удовлетворяют требованиям технического задания, в качестве результата структурно-параметрического синтеза выбирается оптимальная конфигурация. Она позволяет снизить затраты относительно требований технического задания на 404,84 тыс. р. или на 27 %, а общая продолжительность разработки оценена в 7,3 человека-месяца, что на 8,8 % ниже заданного граничными условиями.

Для оценки качества разработанной СВ ТК по метрикам качества подготовки и продолжительности обучения проведены исследования на фокус-группе из 10 человек, 50 % которой обучалось на ТК с оптимальной конфигурацией СВ, а оставшаяся половина – на ТК с СВ минимальной конфигурации.

Качество обучения оценивалось по формуле (9): анализировалось количество успешно выполненных заданий. В качестве продолжительности обучения использовалось пороговое значение, когда вся подгруппа выполняла не менее 80 % заданий (что соответствует качеству 0,8).

Этап обучения группы занимал 1 час, включая инструктаж, подготовку, работу с тренажером, этап рефлексии и оценки. Значения среднего и минимального качества обучения для каждой подгруппы в течение 35 занятий представлены на рис. 2.

Таким образом, при использовании оптимальной конфигурации в среднем группа обучена уже после 11 занятия, полностью – после 27, что удовлетворяет условию задачи. Для минимальной конфигурации получаем: средняя обученность после 26 занятия, полная – после 35.

Среднее качество обучения при ограничении времени обучения (30 занятий) для оптимальной конфигурации составило 0,92, что удовлетворяет условиям. Получено повышение качества обучения относительно граничного условия на 12 %.

Таким образом, задача структурно-параметрического синтеза СВ ТК профессиональной подготовки шахтеров к деятельности в штатных и аварийных ситуациях успешно решена.

Оценивая предлагаемый подход, необходимо отметить, что он имеет высокую практическую и научную ценность по сравнению с классическим экспертным подходом к выбору компонентов: существенно снижено влияние человеческого фактора, повышена объективность оценки. Продолжительность поиска оптимального

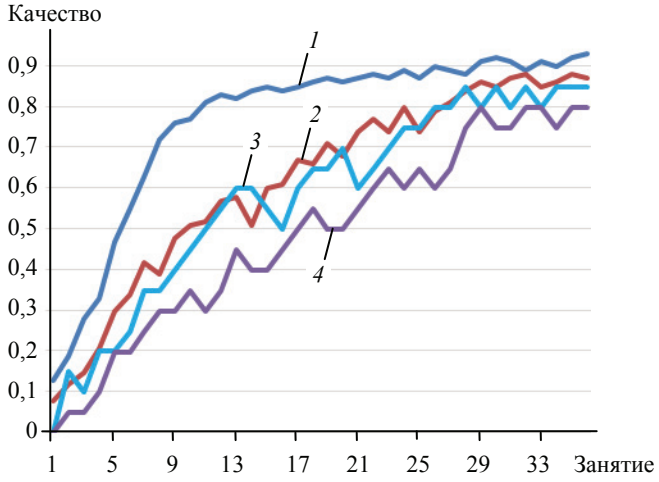


Рис. 2. Динамика изменения качества подготовки двух подгрупп:
1 – 1 подгруппа (оптимальный вариант) – среднее; *2* – 2 подгруппа (минимальный вариант) – среднее; *3* – 1 подгруппа (оптимальный вариант) – минимальное; *4* – 2 подгруппа (минимальный вариант) – минимальное

решения при наличии необходимой базы характеристик компонентов и результатов тестирования на фокус-группах также сокращается в несколько раз за счет сокращения области допустимых решений задачи и упрощения процедуры синтеза СВ. Сравнительный анализ предлагаемой методики и классической экспертной оценки компонентов дан в табл. 9.

Перечисленные достоинства предложенной методики и успешно проведенные с ее помощью экспериментальные исследования позволяют сделать вывод о ее значительном преимуществе по сравнению существующими методами экспертного выбора компонентов визуализации для ТК.

Таким образом, предложена методика синтеза системы визуализации тренажерных комплексов, включающая:

– модель описания и оценки эффективности СВ, основанную на формализации физических процессов в виртуальной среде, учитывающую особенности деятельности персонала при организации процесса освоения на тренажерных комплексах и позволяющую формализовать структуру системы визуализации, определить временные и стоимостные затраты и спрогнозировать возможности системы на этапе проектирования;

– постановку задачи структурно-параметрического синтеза СВ ТК с применением критериев качества и скорости освоения, стоимости и продолжительности разработки программного обеспечения, качества визуализации, стоимости и затрат на обслуживание системы визуализации, учитывающей ограничения на совместимость компонентов;

Таблица 9

Сравнение предлагаемой методики и экспертного подхода

Параметр	Предлагаемая методика	Экспертный подход
Продолжительность поиска решения	Несколько минут (после сбора необходимых исходных данных)	От нескольких часов до нескольких дней
Объективность	Часть критериев основана на оценке экспертов и показателях фокус-групп, остальные рассчитываются по объективным параметрам компонентов	Только субъективная экспертная оценка
Вероятность ошибочного выбора	Минимальна, так как полученное решение удовлетворяет условиям технического задания	Неизвестна заранее
Возможность автоматизации	Методика формализована и подготовлена для программной реализации	Отсутствие формализации и субъективность методики затрудняет ее автоматизацию
Универсальность	Может быть адаптирована для решения задач синтеза различных сложных систем, позволяет решать смежные задачи классификации и оценки компонентов	Методика общеизвестна и применяется при решении многих задач

– алгоритм оценки компонентов визуализации, позволяющий определять эффективность реализации различных метрик конкретной категории по результатам тестирования фокус-группой пользователей и ранжирования компонентов СВ в виде корреляционных матриц.

Полученные результаты структурно-параметрического синтеза СВ для ТК подготовки шахтеров позволило выполнить требования технического задания и существенно повысить ее эффективность по сравнению с требованиями технического задания: снизить затраты на разработку на 27 %, срок разработки – 8,8 %, повысить качество подготовки на 12 %, сократить продолжительность освоения на 10 %.

Разработанный тренажерный комплекс прошел успешную апробацию и внедрен в АО «Корпорация «Росхимзащита» и АО «СУЭК».

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта: договор № 20-37-90123\20 от 25.08.2020.

Список литературы

1. Косцова, М. В. Методы формирования визуального мышления у студентов с нарушениями зрения / М. В. Косцова, И. Л. Пономаренко, А. В. Гришина // Ученые записки. Электронный науч. журнал Курского гос. ун-та. – 2020. – № 2 (54). – С. 260 – 265.

2. Трашкова, А. В. Выбор способа реализации тренажера-симулятора для системы трехмерного моделирования открытых горных работ / А. В. Трашкова, А. В. Вицентий // Труды Кольского науч. центра РАН. – 2020. – Т. 11, № 8-11. – С. 83 – 90. doi: 10.37614/2307-5252.2020.8.11.007

3. Гиацинтов, А. М. Высокоуровневая архитектура тренажерно-обучающих систем сложных технических комплексов / А. М. Гиацинтов, А. В. Родителев // Программные продукты и системы. – 2018. – Т. 31, № 3. – С. 439 – 443.

4. Медицинские тренажеры как базис для отработки хирургических навыков / Н. А. Мартынова, А. Г. Кузьмин, М. Н. Аликберова, Д. В. Лозовицкий // Медико-фармацевтический журнал «Пульс». – 2018. – Т. 20, № 1. – С. 108 – 114.

5. Калашников, А. С. Общий обзор модели стоимости ИТ-проектов COCOMO II / А. С. Калашников // Вестн. науки и образования. – 2019. – № 10-1 (64). – С. 42–43.

6. Ставенко, С. С. Метрики программной продукции: трудоемкость разработки программного обеспечения и модель COCOMO II / С. С. Ставенко, А. И. Раткевич, А. Ю. Харитонов // Экономика и бизнес: теория и практика. – 2018. – № 5-2. – С. 91 – 94.

7. Копелиович, Д. И. Применение методов искусственного интеллекта в 3d-тренажерах на основе функционально-логических моделей / Д. И. Копелиович, А. Л. Сафонов, Р. В. Кондратенко // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2020. – № 4 (10). – С. 33 – 39. doi: 10.30987/2658-6436-2020-4-33-39

8. Решетникова, Е. С. Разработка метода визуализации производственных объектов с применением технологий дополненной реальности / Е. С. Решетникова, Т. В. Усатая, Л. В. Курзаева // Программные системы и вычислительные методы. – 2021. – № 1. – С. 10 – 21. doi: 10.7256/2454-0714.2021.1.32708

Structural-Parametric Synthesis of Visualization Systems for Simulators

A. E. Arkhipov, S. V. Karpushkin

Department of Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering, alexeiarh@gmail.com; TSTU, Tambov, Russia

Keywords: correlation matrices; visualization system; structural-parametric synthesis; training complex.

Abstract: A technique for the synthesis of visualization systems for simulators for industries where training on real operating facilities is impossible is proposed. The technique includes models for describing and evaluating the effectiveness of the visualization systems, setting the problem of structural-parametric synthesis of visualization systems of simulators, an algorithm for evaluating the visualization components based on the ranking of the visualization system components using correlation matrices. An example of the practical application of the developed methodology for designing the visualization systems of simulators for professional training of miners for activities in normal and emergency situations is given.

References

1. Kostsova M.V., Ponomarenko I.L., Grishina A.V. [Methods of formation of visual thinking in students with visual impairments], *Uchenyye zapiski. Elektronnyy nauchnyy zhurnal Kurskogo gosudarstvennogo universiteta* [Scientific notes. Electronic scientific journal of Kursk State University], 2020, no. 2 (54), pp. 260-265. (In Russ.)
2. Trashkova A.V., Vitsentiy A.V. [The choice of a method for implementing a simulator for a system of three-dimensional modeling of open-pit mining], *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2020, vol. 11, no. 8-11, pp. 83-90, doi: 10.37614/2307-5252.2020.8.11.007 (In Russ., abstract in Eng.)
3. Giatsintov A.M., Roditelev A.V. [High-level architecture of training systems for complex technical complexes], *Programmnyye produkty i sistemy* [Software products and systems], 2018, vol. 31, no. 3, pp. 439-443. (In Russ.)
4. Martynova N.A., Kuz'min A.G., Alikberova M.N., Lozovitskiy D.V. [Medical simulators as a basis for developing surgical skills], *Mediko-farmatsevticheskiy zhurnal «Pul's»* [Medico-pharmaceutical journal “Pulse”], 2018, vol. 20, no. 1, pp. 108-114. (In Russ.)
5. Kalashnikov A.S. [General overview of the COCOMO II IT project cost model], *Vestnik nauki i obrazovaniya* [Bulletin of Science and Education], 2019, no. 10-1 (64), pp. 42-43. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Stavenko S.S., Ratkevich A.I., Kharitonov A.Yu. [Software metrics: the complexity of software development and the COCOMO II model], *Ekonomika i biznes: teoriya i praktika* [Economics and business: theory and practice], 2018, no. 5-2, pp. 91-94. (In Russ., abstract in Eng.)
7. Kopeliovich D.I., Safonov A.L., Kondratenko R.V. [Application of artificial intelligence methods in 3d simulators based on functional logic models], *Avtomatizatsiya i modelirovaniye v proyektirovanii i upravlenii* [Automation and modeling in design and management], 2020, no. 4 (10), pp. 33-39, doi: 10.30987/2658-6436-2020-4-33-39 (In Russ., abstract in Eng.)
8. Reshetnikova Ye.S., Usataya T.V., Kurzayeva L.V. [Development of a visualization method for production facilities using augmented reality technologies], *Programmnyye sistemy i vychislitel'nyye metody* [Program systems and computational methods], 2021, no. 1, pp. 10-21, doi: 10.7256/2454-0714.2021.1.32708 (In Russ., abstract in Eng.)

Strukturparametrische Synthese der Visualisierungssysteme für Trainingskomplexe

Zusammenfassung: Es ist eine Methode zur Synthese von Visualisierungssystemen (VS) für Trainingskomplexe (TK) für Industriebranchen vorgeschlagen, in denen ein Training an realen Betriebsobjekten unmöglich ist. Die Technik umfasst Beschreibungsmodelle und Bewertung der Wirksamkeit von VS, Problemstellung der struktur-parametrischen Synthese der VS TK, den Algorithmus zur Bewertung von bildgebenden Komponenten, basierend auf der Rangordnung von VS-Komponenten unter Verwendung von Korrelationsmatrizen. Es ist ein Beispiel für die praktische Anwendung der entwickelten Methodik für die Gestaltung der VS TK für die Berufsausbildung von Bergarbeitern für die Tätigkeit in normalen und Notfallsituationen gegeben.

Synthèse structurellement paramétrique des systèmes d'imagerie pour les complexes de simulation

Résumé: Est proposée une méthode de l synthèse des systèmes d'imagerie (SI) des complexes de simulation (CS) pour les industries où il est impossible d'apprendre à partir des objets réels. La technique comprend des modèles de la description et de l'évaluation de l'efficacité de SI, l'énoncé du problème de la synthèse structurelle et paramétrique des CS SI, l'algorithme de l'évaluation des composants de la visualisation basé sur le classement des composants de SI en utilisant des matrices de corrélation. Est cité un exemple de l'application pratique de la méthodologie élaborée pour la conception de la formation professionnelle des mineurs à l'emploi dans les situations ordinaires et celles d'urgence.

Авторы: ***Архипов Алексей Евгеньевич*** – аспирант кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; ***Карпушкин Сергей Викторович*** – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

УДК 519.711
DOI: 10.17277/vestnik.2022.03.pp.444-454

КОНЦЕПЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ПРОИЗВОДСТВА УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Е. А. Буракова

Кафедра «Техника и технологии производства нанопродуктов», elenburakova@yandex.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия

Ключевые слова: катализатор; методология; синтез; система поддержки принятия решений; углеродные нанотрубки; управление.

Аннотация: Предложена методология создания системы информационной поддержки управления технологической системой (ТС) производства углеродных нанотрубок, обеспечивающей синтез наноструктур с заданными параметрами. При детальном изучении ТС производства УНТ установлены системные связи и закономерности функционирования ее основных элементов, определен состав информационных потоков, сформулирована постановка оптимизационной задачи и подобран способ ее решения.

Введение

В связи с тем, что для каждой области применения необходимы углеродные нанотрубки (**УНТ**) с определенными параметрами (диаметром, длиной, степенью дефектности и др.) актуальной становится проблема организации эффективного управления технологической системой (**ТС**) их производства. Решение данной проблемы позволит осуществлять оперативный перевод ТС на выпуск нового типа нанотрубок с заданными параметрами.

В настоящее время управление параметрами производимых УНТ осуществляется регулированием условий реализации процессов получения катализатора – вещества, на поверхности которого происходит формирование наноструктур, и непосредственно их синтеза [1 – 3]. Такой подход к управлению ТС производства не эффективен при необходимости расширения номенклатуры выпускаемых УНТ, так как требует много времени на поиск и отработку новых составов катализатора, режимов реализации процесса синтеза наноструктур. Поэтому существующие ТС производства УНТ преимущественно ориентированы на производство одного вида наноструктур (один состав катализатора – один тип УНТ).

Организовать эффективное управление ТС производства УНТ методом газофазного химического осаждения (**ГФХО**), как наиболее предпочтительным методом среди известных, представляется возможным путем разработки и внедрения информационной системы поддержки принятия решений (**СППР**). Основная задача СППР состоит в упрощении принятия решений при выборе состава и условий получения катализатора, обеспечивающих реализацию синтеза УНТ с заданными параметрами при неизменных технологических режимах процесса ГФХО.

В работе [4] представлен один из примеров использования информационных систем, позволяющих без проведения экспериментов подбирать катализатор для реализации конкретного технологического процесса. В настоящее время информации о разработке и использовании таких информационных систем в производстве УНТ нет.

В отсутствии методологии разработать СППР в производстве катализатора для синтеза УНТ не представляется возможным. Для ее создания необходимо установить системные связи и закономерности функционирования основных элементов ТС производства УНТ, выбрать методы управления параметрами синтезируемых наноструктур.

В данной работе рассмотрена концепция организации управления ТС производства УНТ методом ГФХО, способствующая решению проблемы реализации синтеза нанотрубок с заданными параметрами.

Управление технологической системой производства УНТ

В результате системного анализа функционирования промышленного производства УНТ методом ГФХО выявлены стадии и процессы, создающие предпосылки для организации эффективного управления ТС. В исследуемой ТС все элементы поделены на активные и вспомогательные. Под термином «активный элемент» подразумевается компонент технической системы, выполняющий функции, определяющие результат ее функционирования в целом. Учитывая заинтересованность производителя в сохранении условий реализации ГФХО и информации о влиянии катализатора на параметры синтезируемых УНТ [5, 6], принято решение организовать управление исследуемой системой на стадии получения катализатора. В качестве метода получения катализатора выбран метод Пекини, как наиболее простой и быстрый способ формирования металлоксидных каталитических систем.

Предварительно проведенные исследования [7, 8], позволившие экспериментально подтвердить ранее выдвинутую гипотезу о физическом воздействии на катализатор/его предшественник, как новом методе управления его свойствами (один состав – разные свойства катализатора), положены в основу методологии создания СППР. Обработка катализатора или его предшественника (раствора исходных компонентов) физическим воздействием – это вновь введенная дополнительная стадия в процесс его получения методом Пекини, которая заключается в преобразовании формируемой каталитической системы различными видами полей (ультразвуковым, магнитным, микроволновым и другими) и излучений.

Данный факт позволил сформулировать и применить принцип введения в ТС производства УНТ дополнительных активных элементов, позволяющих изменять или расширять ее функционал без изменения основных элементов исходной системы. Под дополнительными активными элементами в работе подразумеваются стадии пред- и посттермической обработки катализатора/его предшественника физическим воздействием. С учетом данного принципа осуществлена декомпозиция ТС производства УНТ и показана связь разрабатываемой СППР через лицо принимающее решение (**ЛПР**) с активными элементами системы. Структура данной ТС представлена на рис. 1

Анализ структуры ТС показал, что ориентирование производственной системы на получение УНТ с заданными параметрами производит ЛПР, имеющее доступ к информации от всех ее элементов. Основными производственными процессами – активными элементами данной ТС, являются процессы получения катализатора и синтеза УНТ. Так как управлять исследуемой системой предлагается на стадии обработки катализатора или его предшественника физическим воздействием, то грамотный подбор состава каталитической системы и условий реализации пред- и посттермической ее обработки с использованием информационной системы будет способствовать синтезу УНТ с заданными параметрами.

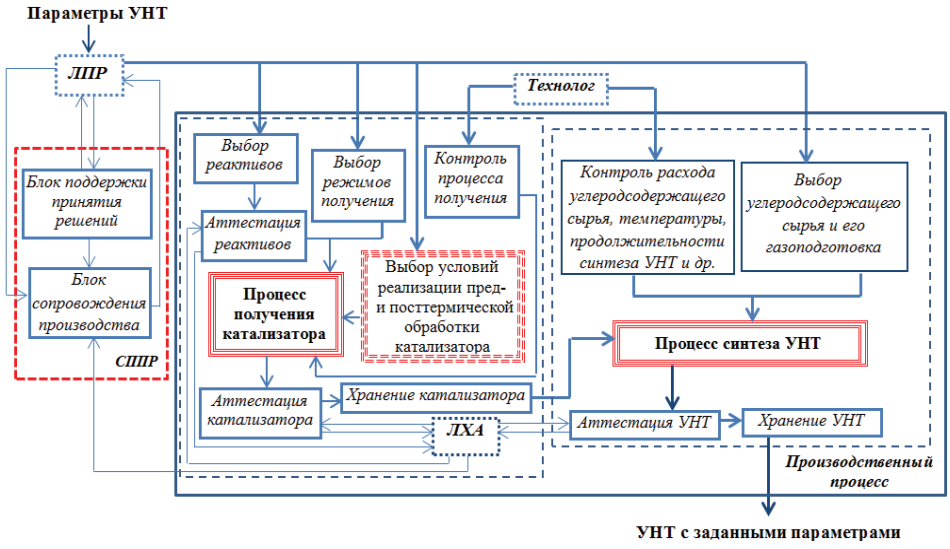


Рис. 1. Структура технологической системы производства УНТ методом ГФХО

Методология создания системы информационной поддержки управления ТС производства УНТ

Для создания СППР разработана методология организации информационной поддержки управления параметрами УНТ на стадии получения катализатора. Согласно анализу научно-технической литературы реализации синтеза УНТ с заданными параметрами можно добиться управлением процесса получения катализатора, а именно подбором состава катализатора и условий его получения, что требует проведения большого количества экспериментов. Такой подход к управлению на производстве способствует сохранению существующей тенденции «один состав катализатора – один тип УНТ» и не предполагает быстрого перехода ТС на производство нанотрубок другого типа.

В свою очередь организовать эффективное управление ТС, позволяющее осуществлять в сжатые сроки перевод производства на выпуск наноструктур нового типа с заданными параметрами и повысить его технико-экономические показатели, возможно через постановку и решение задачи оптимизации условий получения катализатора синтеза УНТ.

Для этого, в связи с тем, что управление свойствами катализатора осуществляется с использованием нового метода, необходимо разработать методику проведения эксперимента и, реализовав ее, установить функциональные зависимости между параметрами синтезируемых УНТ и условиями обработки катализатора/его предшественника физическим воздействием. Данные зависимости будут использоваться при постановке оптимизационной задачи в качестве уравнений связей. Реализация предлагаемой методологии позволит разработать СППР, которая быстро, без проведения дополнительных экспериментов установит состав, тип и условия обработки катализатора, обеспечивающие синтез УНТ с заданными параметрами.

Структура методологии создания системы информационной поддержки управления ТС производства УНТ с учетом предлагаемого в работе принципа представлена на рис. 2.

Рис. 2. Структура методологии создания системы информационной поддержки управления ТС производства УНТ

Важными задачами при реализации методологии остаются установление состава информационных потоков, выявление управляющих факторов, которые оказывают влияние на параметры синтезируемых нанотрубок, а также исследование системных связей и закономерностей функционирования активных элементов ТС производства УНТ.

Экспериментальное изучение процесса получения катализатора методом Пекини показало, что это сложно контролируемый процесс из-за одновременного и взаимосвязанного протекания процессов различной природы. Данный факт учтен при определении состава информационных потоков ТС производства УНТ (рис. 3).

Входной информационный поток процесса получения катализатора X представляет собой набор данных, характеризующих управляющие и возмущающие факторы, и может быть записан в виде

$$X = \langle C, \omega_{air}, t_0, \vec{\psi}, P, t_{о.с.}, t_п, t_к, P_{атм}, \tau_{об}, t_{об}, W_{об}, \Delta t_{о.с.}, \Delta P_{атм}, ... \rangle,$$

где C – состав катализатора, определяющий его тип, и зависящий от содержания активного компонента, носителя и промотора; ω_{air} – расход газовой среды, м^3/с; t_0 – температура раствора исходных компонентов катализатора, °С; $\vec{\psi}$ – геометрические размеры емкости для пред- и посттермической обработки катализатора/его предшественника; P – тип обработки катализатора; $t_{о.с.}$ – температура

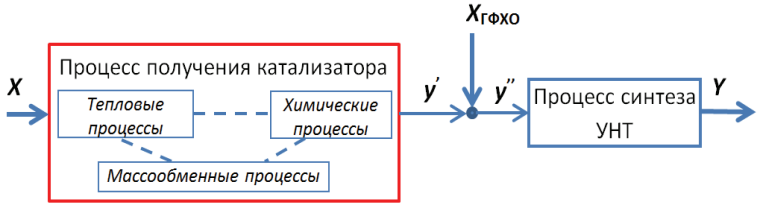


Рис. 3. Схема информационных потоков в ТС производства УНТ

окружающей среды, °С; $t_п$, $t_к$ – температуры среды в рабочей зоне и слое катализатора соответственно, °С; $P_{атм}$ – атмосферное давление, Па; $W_{об}$ – удельная мощность обработки, Вт/м^3; $\tau_{об}$ – продолжительность обработки, с; $t_{об}$ – температура обработки, °С; $\Delta t_{о.с.}$ – нестабильность температуры окружающей среды; $\Delta P_{атм}$ – нестабильность атмосферного давления.

Выходной информационный поток процесса получения катализатора y' характеризует металлоксидную форму катализатора и может быть представлен как

$$y' = \langle S_{уд}, \rho, \ell_{ср}, \chi, ... \rangle,$$

где $S_{уд}$ – удельная поверхность, м^2/г; ρ – насыпная плотность, кг/м^3; $\ell_{ср}$ – средний диаметр частиц металлоксидной формы катализатора, мкм; χ – геометрические размеры кристаллитов, мкм.

Металлоксидная форма катализатора, взаимодействуя с углеродсодержащим сырьем, в процессе синтеза УНТ претерпевает изменения. Под действием водорода она восстанавливается до металлической, поэтому выходной информационный поток процесса получения катализатора y' является по сути промежуточным в исследуемой ТС. Помимо свойств катализатора, параметры синтезируемых УНТ также определяются условиями реализации ГФХО, поэтому входной информационный поток процесса синтеза $X_{ГФХО}$ можно представить в виде

$$X_{ГФХО} = \langle P_{C_xH_y}, G_{C_xH_y}, T_{ГФХО}, \tau_{ГФХО}, ... \rangle,$$

где $P_{C_xH_y}$ – тип углеродсодержащего сырья; $G_{C_xH_y}$ – расход углеродсодержащего сырья, м^3/ч; $T_{ГФХО}$ – температура ГФХО, °С; $\tau_{ГФХО}$ – продолжительность ГФХО, ч.

Выходной промежуточный информационный поток процесса получения катализатора y', взаимодействуя с входным потоком процесса синтеза $X_{ГФХО}$, образует основной входной информационный поток процесса синтеза нанотрубок y'', который может быть записан как

$$y'' = \langle y', X_{ГФХО} \rangle.$$

Оценку эффективности предлагаемого в работе метода управления исследуемой ТС предлагается проводить по наиболее востребованным параметрам синтезируемых УНТ. Исходя из этого, выходной информационный поток процесса синтеза углеродных нанотрубок Y имеет следующий вид:

$$Y = \langle D, d, \gamma, I_{D/G}, ... \rangle,$$

где D и d – соответственно внешний и внутренний диаметры УНТ, нм; γ – удельный выход, $г_C/г_{cat}$, $I_{D/G}$ – степень дефектности УНТ, которая определяется методом рамановской спектроскопии [9] по отношению интенсивностей мод, вызванных дефектом симметрии графенового слоя I_D и колебаниями атомов углерода в плоскости графенового слоя I_G.

Предварительное исследование влияния контролируемых, но не поддающихся управлению таких факторов, как $P_{атм}$, $t_{о.с.}$, $\Delta P_{атм}$, $\Delta t_{о.с.}$ показало, что оно не существенно, и при дальнейшем изучении функционирования ТС производства УНТ ими можно пренебречь.

Так как реализация синтеза УНТ с параметрами, значения которых являются наиболее близкими к заданным, возможна благодаря управлению процессом формирования катализатора, основанном не только на варьировании состава катализатора, а главным образом на его пред- и посттермической обработке физическими воздействиями, то наиболее важными управляющими факторами в данном случае являются тип P, время $\tau_{об}$, температура $t_{об}$ и удельная мощность их обработки $W_{об}$.

Установив состав выходного информационного потока Y (рис. 3), с использованием метода аддитивной свертки частных критериев, формулируем критерий для оценки эффективности управления ТС производства УНТ в виде комплексного критерия оптимальности процесса получения катализатора. В общем виде комплексный критерий оптимальности процесса получения катализатора представляет собой сумму модулей относительных отклонений компонент информационного потока Y с соответствующими весовыми коэффициентами:

$$M = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \left| \frac{z_i - z_{i0}}{z_{i0}} \right|, \tag{1}$$

где z_i – полученное значение, а z_{i0} – заданное значение параметра, являющегося компонентой информационного потока Y; n – количество параметров, характеризующих данный информационный поток; α_i – весовой коэффициент.

Значения весовых коэффициентов определяются областью применения синтезируемых УНТ на основе экспертной оценки.

Согласно предлагаемой методологии создания системы информационной поддержки управления ТС производства УНТ (см. рис. 2), оптимизационная задача сводится к определению состава, типа и условий обработки катализатора/его предшественника физическим воздействием. Так как процессы их пред- и посттермической обработки физическим воздействием являются сложными и до конца не изученными совмещенными процессами, то применение аналитических и экспериментально-аналитических математических моделей для их описания на данном этапе нецелесообразно. Поэтому при постановке оптимизационной задачи в качестве уравнений связей предложено использовать функциональные зависимости, полученные на основе обработки экспериментальных данных.

Для формализации оптимизационной задачи необходимо установить функциональные зависимости параметров, характеризующих выходной информационный поток Y, от состава катализатора, типа и условий физического воздействия на него и его предшественника. В соответствии с методологией (см. рис. 2) аппроксимационные зависимости рекомендуется представлять в следующем виде:

$$Y(C, P, \tau_{об}, t_{об}, W_{об}) = \begin{cases} C = 1: \\ P = 1 \end{cases} \begin{matrix} D_1 = f_{D1}(\tau_{об}, t_{об}, W_{об}); \; d_1 = f_{d1}(\tau_{об}, t_{об}, W_{об}); \\ \gamma_1 = f_{\gamma 1}(\tau_{об}, t_{об}, W_{об}); \; I_{D/G1} = f_{I_{D/G1}}(\tau_{об}, t_{об}, W_{об}); \end{matrix} \\ \begin{cases} C = 1 \\ P = 2 \end{cases} : \begin{matrix} D_2 = f_{D2}(\tau_{об}, t_{об}, W_{об}); \; d_2 = f_{d2}(\tau_{об}, t_{об}, W_{об}); \\ \gamma_2 = f_{\gamma 2}(\tau_{об}, t_{об}, W_{об}); \; I_{D/G2} = f_{I_{D/G2}}(\tau_{об}, t_{об}, W_{об}); \end{matrix} \\ \begin{cases} C = \ldots \\ P = \ldots \end{cases} : \quad \ldots; \quad \ldots. \tag{2}$$

При этом состав катализатора и тип физического воздействия являются дискретными величинами, а параметры синтезированных УНТ, определяемые условиями физического воздействия, – непрерывными.

На основе информации о составе информационных потоков общая постановка задачи оптимизации условий получения катализатора принимает следующий вид: для синтеза УНТ с заданными значениями параметров D_0, d_0, γ_0, $I_{D/G0}$ необходимо найти такие значения

$$C, P, \tau_{об}, t_{об}, W_{об},$$

при которых критерий оптимальности (1) с учетом ограничений:

$$C = \overline{1, N_C}; \; P = \overline{0, N_p};$$

$$\tau_{об} \in \left[\tau_{об\,min};\; \tau_{об\,max}\right];\; t_{об} \in \left[t_{об\,min};\; t_{об\,max}\right];\; W_{об} \in \left[W_{об\,min};\; W_{об\,max}\right]$$

и связей (2) принимает минимальное значение, где N_C, N_p – количество составов катализатора и типов физического воздействия. Учитывая состав выходного информационного потока Y исследуемой производственной системы, критерий оптимальности можно представить в следующем виде:

$$M = \alpha_D \left| \frac{D(C, P, \tau_{об}, t_{об}, W_{об}) - D_0}{D_0} \right| + \alpha_d \left| \frac{d(C, P, \tau_{об}, t_{об}, W_{об}) - d_0}{d_0} \right| +$$

$$+ \alpha_\gamma \left| \frac{\gamma(C, P, \tau_{об}, t_{об}, W_{об}) - \gamma_0}{\gamma_0} \right| + \alpha_{I_{D/G}} \left| \frac{I_{D/G}(C, P, \tau_{об}, t_{об}, W_{об}) - I_{D/G0}}{I_{D/G0}} \right| + \ldots \to \min$$

Для решения данной оптимизационной задачи предлагается использовать метод сканирования, как метод, гарантирующий нахождение глобального минимума целевой функции. Решение оптимизационной задачи позволит перейти к созданию СППР в производстве катализаторов, обеспечивающей реализацию синтеза УНТ с заданными параметрами.

Система поддержки принятия решений

Система поддержки принятия решений, разработанная в ходе реализации методологии, представляет собой модуль поиска минимума целевой функции и базу данных. При ее создании рекомендуется использовать метод анализа иерархий [10], позволяющий ЛПР оценивать все возможные варианты организации процесса получения катализатора. Принцип функционирования СППР состоит в том, что модуль поиска минимума целевой функции через пользовательский интерфейс от ЛПР получает информацию о значениях параметров УНТ, которые необходимо синтезировать для Заказчика. На основе данной информации модуль осуществляет поиск всех возможных сочетаний типов катализатора и обработки их физическим воздействием. Для каждого сочетания он из базы данных определяет набор зависимостей: $D = f_D(\ldots)$; $d = f_d(\ldots)$; $\gamma = f_\gamma(\ldots)$; $D/G = f_{D/G}(\ldots)$ в виде аппроксимирующих функций от $\tau_{об}$, $t_{об}$ и $W_{об}$, полученных в результате обработки экспериментальных данных. Методом сканирования определяется минимум целевой функции, которая характеризует степень отклонения значений параметров синтезируемых УНТ от заданных, и сохраняются значения найденных условий реализации пред- и посттермической обработки катализатора и его предшественника физическим воздействием. Процедура обращения модуля поиска минимума целевой функции к базе данных повторяется для всех возможных вариантов, что приводит к формированию последовательности режимов, отсортированных по возрастанию значения целевой функции.

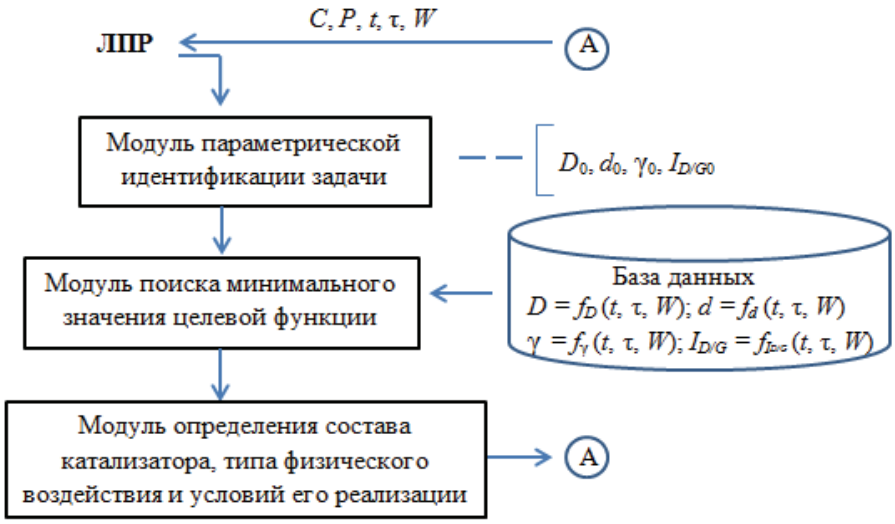


Рис. 4. Структурная схема функционирования СППР

Данный рейтинг предоставляется ЛПР для выбора режимов получения катализатора, обеспечивающего синтез УНТ с параметрами, значения которых наиболее близки к заданным, с учетом интересов производителя и производственных возможностей на данный момент. Система поддержки принятия решений предусматривает возможность ЛПР сузить поиск, ограничив информационную систему выбором предпочитаемых типов углеродсодержащих газов и составов катализатора, используемых в производстве.

Сведения об условиях получения катализатора и обработки его физическим воздействием предлагается хранить в базе данных иерархического типа в открытом формате. Такой подход не требует сложных систем обслуживания базы данных и позволяет легко вводить в нее информацию о новых составах и методах обработки катализатора/его предшественника физическим воздействием.

Структурная схема функционирования СППР представлена на рис. 4.

В соответствии с предложенной методологией на базе Borland Delphi 7 создана и зарегистрирована СППР при производстве катализатора синтеза УНТ, которая показала свою эффективность при производстве УНТ на базе ООО «НаноТЦ» и АО «ЗАВКОМ» [12]. На основе информации, полученной от СППР, на территории АО «ЗАВКОМ» создано опытно-промышленное производство Co-Mo/Al_2O_3-MgO катализатора, обеспечивающего синтез коаксиальных УНТ диаметром 8…15 нм и степенью дефектности ~1.

Использование информационной системы [11] в производстве катализатора синтеза УНТ способствовало сокращению времени, необходимого для перехода исследуемой ТС на выпуск новых типов наноструктур и снижению нагрузки на химика-технолога. Это доказывает правомерность использования предлагаемой в работе концепции управления ТС производства углеродных нанотрубок методом ГФХО.

Заключение

Предлагаемая в работе концепция управления технологической системой производства УНТ методом ГФХО включает в себя новый метод управления свойствами катализатора путем обработки его физическим воздействием, принцип

введения в исследуемую систему дополнительных активных элементов, позволяющих изменять или расширять ее функционал без изменения исходных основных элементов.

Детальное изучение ТС производства УНТ позволило установить системные связи и закономерности функционирования ее основных элементов, определить состав информационных потоков, сформулировать постановку оптимизационной задачи, подобрать способы ее решения и перейти к созданию информационной системы поддержки принятия решения. Введение в технологическую систему производства нанотрубок СППР и стадий пред- и посттермической обработки катализатора/его предшественника физическим воздействием, как дополнительных активных элементов, позволяющих решить проблему организации эффективного управления данной системой, способствует расширению номенклатуры выпускаемых наноструктур и ее быстрому переводу на выпуск нанотрубок с заданными параметрами. Эффективность СППР, созданной на основе разработанной методологии, подтверждается фактом ее использования в реальном производстве УНТ.

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект 22-23-01072).

Список литературы

1. Evidence of Correlation Between Catalyst Particles and the Single-Wall Carbon Nanotube Diameter: a First Step Towards Chirality Control / M. Fiawoo, A. Bonnot, H. Amara [et al.] // Physical Review Letters. – 2012. – Vol. 108 (19). – P. 195503. doi: 10.1103/PhysRevLett.108.195503

2. Мищенко, С. В. Углеродные наноматериалы. Производство, свойства, применение / С. В. Мищенко, А. Г. Ткачев. – М. : Машиностроение, 2008. – 320 с.

3. Кульметьева, В. Б. Влияние условий каталитического пиролиза паров этанола на характеристики углеродных нанотрубок / В. Б. Кульметьева, И. А. Мальцев // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – URL : https://science-education.ru/ru/article/view?id=16012 (дата обращения: 22.09.2022).

4. Разработка информационной системы выбора и расчета катализаторов на основе ВПЯМ / С. В. Прокудин, А. В. Беспалов, В. Н. Грунский, А. И. Козлов // Успехи в химии и химической технологии. – 2007. – Т. 21, № 2 (70). – С. 79 – 84.

5. Чесноков, В. В. Особенности механизма образования углеродных нанонитей с различной кристаллографической структурой из углеводородов на катализаторах содержащих металлы подгруппы железа / В. В. Чесноков, Р. А. Буянов // Критические технологии. Мембраны. – 2005. – № 4 (28). – С. 75 – 79.

6. Царева, С. Ю. Исследование влияния природы и размера частиц катализатора на образование нанотрубок в методе каталитического пиролиза углеводородов / С. Ю. Царева, Е. В. Жариков, А. Н. Коваленко // Наукоемкие технологии. – 2004. – № 6. – С. 38 – 42.

7. Буракова, Е. А. Управление процессом формирования катализатора для синтеза углеродных наноструктурных материалов / Е. А. Буракова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2022. – Т. 28, № 1. – С. 127 – 138. doi: 10.17277/vestnik.2022.01.pp.127-138

8. Experimental and Simulation Studies to Determine the Mechanisms of Catalyst Formation for the Targeted Synthesis of Carbon Nanotubes / I. Ali, E. Burakova, A. Tkachev [et al.] // Journal of Nanoparticle Research. – 2021. – Vol. 23, No. 9. – P. 198. doi: 10.1007/s11051-021-05320-3

9. Ferrari, A. Interpretation of Raman Spectra of Disordered and Amorphous Carbon / A. Ferrari, J. Robertson // Physical Review B. – 2000. – Vol. 61, No. 20. – P. 14095 – 14107. doi: 10.1103/PhysRevB.61.14095

10. Рыбак, В. А. Аналитический обзор и сравнение существующих технологий поддержки принятия решений / В. А. Рыбак, Шокр Ахмад // Системный анализ и прикладная информатика. – 2016. – № 3. – С. 12 – 18.

11. Буракова, Е. А. Информационная поддержка принятия решений при производстве катализатора синтеза углеродных нанотрубок / Е. А. Буракова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2021. – № 3 (55). – С. 9 – 15. doi: 10.21672/2074-1707.2021.55.3.009-015

12. Свидетельство о гос. рег. программ для ЭВМ № 2022610403. Модуль информационной системы поддержки принятия решения при производстве катализаторов для синтеза углеродных нанотрубок / Е. А. Буракова, Г. Ю. Юрков, А. В. Рухов, Е. С. Бакунин, А. Г. Ткачев, О. С. Неверова (РФ). – Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ. – 11 января 2022 г.

The Concept of Managing the Process System for the Production of Carbon Nanotubes

E. A. Burakova

Department of Equipment and Technology for Nanoproduction, elenburakova@yandex.ru; TSTU, Tambov, Russia

Keywords: catalyst; methodology; synthesis; decision support system; carbon nanotubes; control.

Abstract: The paper proposes a methodology for creating an information support system to manage the process system for the production of carbon nanotubes, which provides the synthesis of nanostructures with specified parameters. A detailed study of the process system for the production of CNTs established systemic relationships and patterns of functioning of its main elements, determined the composition of information flows, formulated an optimization problem, and found a method for solving it.

References

1. Fiawoo M., Bonnot A., Amara H., Bichara C., Thibault-Pénisson J., Loiseau A. Evidence of Correlation Between Catalyst Particles and the Single-Wall Carbon Nanotube Diameter: a First Step Towards Chirality Control, *Physical Review Letters*, 2012, vol. 108 (19), p. 195503, doi: 10.1103/PhysRevLett.108.195503

2. Mishchenko S.V., Tkachev A.G. *Uglerodnyye nanomaterialy. Proizvodstvo, svoystva, primeneniye* [Carbon nanomaterials. Production, properties, application], Moscow: Mashinostroyeniye, 2008, 320 p. (In Russ.)

3. https://science-education.ru/ru/article/view?id=16012 (accessed 22 September 2022).

4. Prokudin S.V., Bespalov A.V., Grunskiy V.N., Kozlov A.I. [Development of an information system for selecting and calculating catalysts based on HPCM], *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Advances in Chemistry and Chemical Technology], 2007, vol. 21, no. 2 (70), pp. 79-84. (In Russ.)

5. Chesnokov V.V., Buyanov R.A. [Features of the mechanism of formation of carbon nanowires with different crystallographic structure from hydrocarbons on catalysts containing metals of the iron subgroup], *Kriticheskiye tekhnologii. Membrany* [Critical Technologies. Membranes], 2005, no. 4 (28), pp. 75-79. (In Russ.)

6. Tsareva S.Yu., Zharikov Ye.V., Kovalenko A.N. [Study of the influence of the nature and size of catalyst particles on the formation of nanotubes in the method of catalytic pyrolysis of hydrocarbons], *Naukoyemkiye tekhnologii* [Science-intensive technologies], 2004, no. 6, pp. 38-42. (In Russ.)

7. Burakova Ye.A. [Control of the formation of a catalyst for the synthesis of carbon nanostructured materials], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2022, vol. 28, no. 1, pp. 127-138, doi: 10.17277/vestnik.2022.01.pp.127-138 (In Russ., abstract in Eng.)

8. Ali I., Burakova E., Tkachev A. [et al.] Experimental and Simulation Studies to Determine the Mechanisms of Catalyst Formation for the Targeted Synthesis of Carbon Nanotubes, *Journal of Nanoparticle Research*, 2021, vol. 23, no. 9, p. 198, doi: 10.1007/s11051-021-05320-3

9. Ferrari A., Robertson J. Interpretation of Raman Spectra of Disordered and Amorphous Carbon, *Physical Review B*, 2000, vol. 61, no. 20, pp. 14095-14107, doi: 10.1103/PhysRevB.61.14095

10. Rybak V.A., Shokr Akhmad [Analytical review and comparison of existing decision support technologies], *Sistemnyy analiz i prikladnaya informatika* [System analysis and applied informatics], 2016, no. 3, pp. 12-18. (In Russ., abstract in Eng.)

11. Burakova Ye.A. [Information support for decision-making in the production of a catalyst for the synthesis of carbon nanotubes], *Prikaspiyskiy zhurnal: upravleniye i vysokiye tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2021, no. 3 (55), pp. 9-15, doi: 10.21672/2074-1707.2021.55.3.009-015 (In Russ., abstract in Eng.)

12. Burakova Ye.A., Yurkov G.Yu., Rukhov A.V., Bakunin Ye.S., Tkachev A.G., Neverova O.S. *Modul' informatsionnoy sistemy podderzhki prinyatiya resheniya pri proizvodstve katalizatorov dlya sinteza uglerodnykh nanotrubok* [Decision Support Information System Module for the Production of Catalysts for the Synthesis of Carbon Nanotubes], Russian Federation, 2022, Certificate of state registration of computer programs No. 2022610403. (In Russ.)

Das Konzept der Steuerung des technologischen Produktionssystems der Kohlenstoff-Nanoröhren

Zusammenfassung: Es ist eine Methodik zur Schaffung des Informationsunterstützungssystems zur Steuerung des technologischen Systems zur Herstellung von Kohlenstoffnanoröhren vorgeschlagen, das die Synthese von Nanostrukturen mit festgelegten Parametern bereitstellt. Eine detaillierte Studie des TS zur Herstellung von CNTs ermöglichte es, systemische Beziehungen und Funktionsmuster seiner Hauptelemente festzustellen, die Zusammensetzung von Informationsflüssen zu bestimmen, ein Optimierungsproblem zu formulieren und Methoden zu seiner Lösung auszuwählen.

Conception de la commande du système technologique de la production des nanotubes de carbone

Résumé: Est proposée une méthodologie pour la création d'un système d'information pour la commande d'un système technologique de la production des nanotubes de carbone permettant la synthèse des nanostructures avec des paramètres prédéfinis. Sont établis des liens systémiques et des modèles de fonctionnement de éléments de base système. Est déterminée la composition des flux d'information. Est formulé le problème d'optimisation. Sont choisis les moyens de la résolition.

Автор: ***Буракова Елена Анатольевна*** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

УДК 536.2
DOI: 10.17277/vestnik.2022.03.pp.455-465

НОВЫЕ СТАЦИОНАРНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

В. П. Ходунков[1], Ю. П. Заричняк[2]

Информационно аналитический отдел, walkerearth@mail.ru;
ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский
институт метрологии им. Д. И. Менделеева» (1), Санкт-Петербург, Россия;
Факультет энергетики и экотехнологий (2),
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики», Санкт-Петербург, Россия

Ключевые слова: абсолютный метод; дифференциальное сканирование; кондуктометрия; разнородный материал; совокупное измерение; теплопроводность; электротепловая аналогия; эталон.

Аннотация: Рассмотрены два стационарных метода измерения теплопроводности твердых тел и дано их теоретическое обоснование. Показаны принципиальные структурные схемы реализующих их устройств. Выполнена оценка ожидаемой точности, обеспечиваемой данными методами.

Обозначения

N – количество образцов, отн. ед;
$P_i^{(j)}$ – измеренная мощность i-го внешнего источника в j-м режиме, Вт;
S_i – площадь поперечного сечения i-го образца, м^2;
T – температура, К;
d, $d_М$ – диаметры, м, соответственно образцов и матрицы;
h – высота матрицы, м;
h_i – толщина i-го образца, м;
k_1, k_2 – постоянные коэффициенты;
q – плотность теплового потока, Вт/м^2;
x – координата в направлении, нормальном к поперечному сечению образцов, м;
σ – тепловая проводимость i-го образца, Вт/К;
λ_i – теплопроводность i-го образца, Вт/(м·К);
ΔP – разность электрических мощностей, Вт;
ΔT – перепад температуры, К;
$\Delta T_i^{(j)}$ – измеренный перепад температуры на i-м образце в j-м режиме, К

Введение

Измерение теплофизических свойств веществ, в том числе теплопроводности, всегда актуально, особенно сейчас, когда активно развиваются новые технологии по созданию композиционных материалов с заранее заданными свойствами, где теплопроводность является одним из важных задаваемых физических параметров. Для современного уровня развития науки и техники в области измерений теплопроводности характерно многообразие методов, о чем свидетельствуют периодически появляющиеся публикации по данной тематике. Для измерений широко используются как стационарные методы [1] так и нестационарные, основанные на регулярном тепловом режиме 1 – 3 рода [2 – 5], теории температурных волн и др. [6]. Все методы обладают определенными достоинствами, недостатками и, в зависимости от условий применения и поставленных задач, могут быть как эффективными, так и наоборот.

Один из недостатков большинства методов заключается в том, что они не являются абсолютными, поэтому для их реализации требуется эталонный образец, теплопроводность которого заранее и точно известна. Это ощутимо увеличивает погрешность измерений. Другой недостаток заключается в ограничении номенклатуры исследуемых материалов и обусловлен требованием близости значений теплопроводности исследуемого и эталонного образцов, поэтому методы зачастую не обеспечивают возможность измерения образцов с сильно отличающимися теплопроводностями. В качестве примера можно привести Государственный эталон единицы теплопроводности ГЭТ 59-2007, который основан на стационарном методе [7], где осуществляется воспроизведение единицы теплопроводности в ограниченных диапазонах, Вт/(м·К), 0,1…5 и 5…20, при этом расширенная относительная неопределенность измерений составляет 0,8 – 2 %.

Рассмотрим два метода, разработанные с целью дальнейшего достижения более высокой точности и расширения диапазонов измеряемой величины [8, 9]. Стационарный абсолютный метод дифференциально-сканирующей тепловой кондуктометрии и метод совокупного измерения теплопроводности предназначены для исследований материалов с отличающимися теплопроводностями и, самое главное, не предусматривают использование эталонного образца.

Принцип и схемы измерения

В теоретическую основу обоих методов положено уравнение Фурье, описывающее стационарное одномерное температурное поле в пластине, формирующееся под воздействием проходящего через нее стационарного теплового потока заданной величины.

По своей сути, оба метода построены по одному и тому же принципу, но отличаются лишь количеством образцов, используемых при измерениях. Данное отличие обусловлено степенью различия теплопроводностей исследуемых образцов. Первый метод [8], где используются три образца, предназначен для измерения сильно различающихся теплопроводностей. Второй метод [9], в котором используются два образца, позволяет измерять равные или мало отличающиеся друг от друга теплопроводности. Схемы тепловых ячеек методов представлены на рис. 1; внешний вид исследуемых образцов, используемых в первом методе, – рис. 2.

На рисунках обозначены: 1, 2, 3 – исследуемые образцы; 4 – сток теплоты, который равномерно распределен по плоскости соприкосновения образцов; 5, 6 – источники теплоты (нагревательные элементы), равномерно распределенные по наружным плоскостям исследуемых образцов

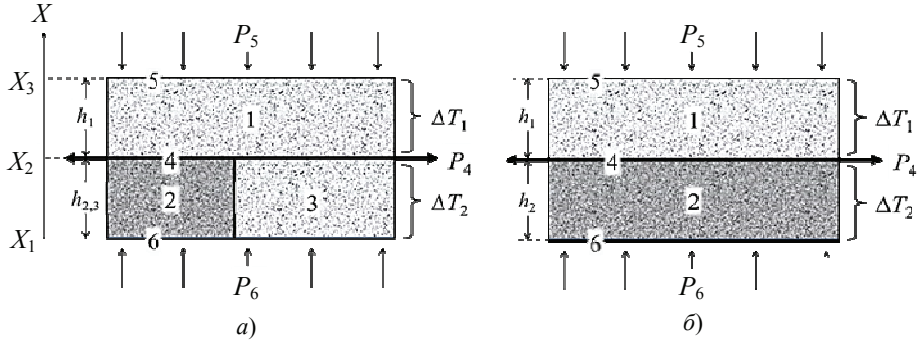


Рис. 1. Схемы тепловых ячеек первого (*а*) и второго (*б*) методов

В методе дифференциально-сканирующей тепловой кондуктометрии разнородных твердых материалов [8] используют три одинаковых по толщине плоских образца 1, 2, 3, два из которых (1, 3) выполнены из одного и того же материала. В абсолютном методе дифференциально-сканирующей тепловой кондуктометрии [9] используют два одинаковых по толщине плоских образца 1, 2.

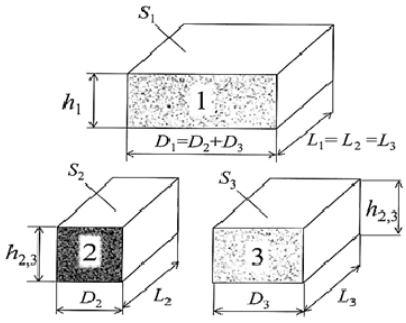


Рис. 2. Внешний вид исследуемых образцов для первого метода

Вывод уравнений измерений методов

В обоих методах измерения выполняются в двух режимах:

– равенства температурных перепадов на исследуемых образцах, то есть $\Delta T_1 = \Delta T_2$;

– равенства плотностей теплового потока через образцы, то есть $P_5 - P_4 = P_6 - P_4$. Это обеспечивает получение двух решаемых относительно теплопроводности уравнений с двумя неизвестными теплопроводностями.

Первый метод. Согласно общей формулировке, краевая задача для измерительной ячейки (см. рис. 1, *а*) математически записывается следующим образом:

– уравнения теплопроводности, выраженные через тепловые проводимости образца 1 и образцов 2, 3 имеют вид:

$$\begin{cases} P_5 - P_4 = \sigma_1 \Delta_1 \\ P_6 - P_4 = \sigma_{2-3} \Delta T_{2,\,3} \end{cases}, \tag{1}$$

– граничные условия 4-го рода:

при $x = x_1$

$$P_6/S_1 = -\lambda_2 dT_2/dx = -\lambda_3 dT_3/dx;$$

$$T_2(x = x_1) = T_3\,(x = x_1) = f(P_6); \tag{2}$$

$x = x_2$

$$P_4/S_1 = -\lambda_2 dT_2/dx = -\lambda_3 dT_3/dx == -\lambda_1 dT_1/dx;$$

$$T_2(x = x_2) = T_3(x = x_2) = T_1(x = x_2) = \text{const}; \tag{3}$$

$x = x_3$

$$P_5/S_1 == -\lambda_1 dT_1/dx;$$

$$T_1(x = x_3) = f(P_5), \tag{4}$$

где $\sigma_1 = \lambda_1 S_1/h_1$ – тепловая проводимость образца 1; $\sigma_{2-3} = (\lambda_2 S_2 + \lambda_3 S_3)/h_{2,\,3}$ – эффективная тепловая проводимость системы тел «образец 2 – образец 3»; λ_1, λ_2, λ_3 – теплопроводности образцов 1, 2, 3 соответственно, при этом $\lambda_1 = \lambda_3 > \lambda_2$; S_1, S_2, S_3 – площади поперечного сечения образцов 1, 2, 3 соответственно (см. рис. 2), при этом принимают, что $S_3 = k_1 S_1$, $S_2 = (1 - k_1)S_1$, причем $S_1 = S_2 + S_3$; h_1 , $h_{2,\,3}$ – толщины образцов 1 и 2, 3 соответственно, при этом принимают, что $h_{2,3} = k_2 h_1$.

Для расчета эффективной тепловой проводимости $\sigma_{2\text{-}3}$ системы тел «образец 2 – образец 3» используют так называемую электротепловую аналогию – метод расчета тепловых систем, сводящийся к расчету эквивалентных линейных электриче-

ских схем [10]. Согласно электротепловой аналогии эффективная тепловая проводимость двух параллельно расположенных участков тепловой цепи равна сумме тепловых проводимостей каждого участка. При этом тепловая проводимость каждого участка тепловой цепи прямо пропорциональна его теплопроводности и площади его поперечного сечения и обратно пропорциональна длине данного участка тепловой цепи (толщине $h_{2,\,3}$ образцов 2, 3). Исходя из этого, получено приведенное выше соотношение для эффективной тепловой проводимости σ_{2-3} системы тел «образец 2 – образец 3».

Габаритные размеры образцов 1, 2, 3 выбирают предварительно, исходя из двух одновременных требований, которые заключаются в том, чтобы:

– измеряемая разность мощностей внешних источников теплоты 5, 6, при которой достигается равенство стационарных перепадов температуры, должна быть достаточной для ее точного измерения;

– стационарный перепад температуры в системе тел «образец 2 – образец 3», достигаемый при равенстве мощностей внешних источников теплоты, должен быть соизмерим с заданным стационарным перепадом температуры на образце 1.

Для этого используют предварительно получаемые расчетные зависимости разности мощностей внешних источников 5, 6 от соотношения толщин образцов 2, 3 и образца 1 для различного соотношения площадей поперечного сечения образцов 2, 3 (рис. 3). На примере осуществления метода показано, как получить указанные зависимости и определить наиболее оптимальные размеры образцов 1, 2, 3.

Метод реализуют на основе уравнений (1) – (4) в два этапа. На первом этапе выполняют компарирование образцов 2, 3 и образца 1 по мощности соответствующих им внешних источников теплоты 6, 5. Для этого при заданной неизменной и стабилизированной во времени мощности P_4 внутреннего стока теплоты 4 путем регулирования мощностей внешних источников теплоты 6, 5 достигают заданного равенства стационарных перепадов температуры $\Delta T_1^{(1)} = \Delta T_{2,\,3}^{(1)}$ на образце 1 и в системе тел «образец 2 – образец 3». По достижении равенства перепадов измеряют стационарный перепад температуры $\Delta T_1^{(1)} = \Delta T_{2,\,3}^{(1)}$ и мощности

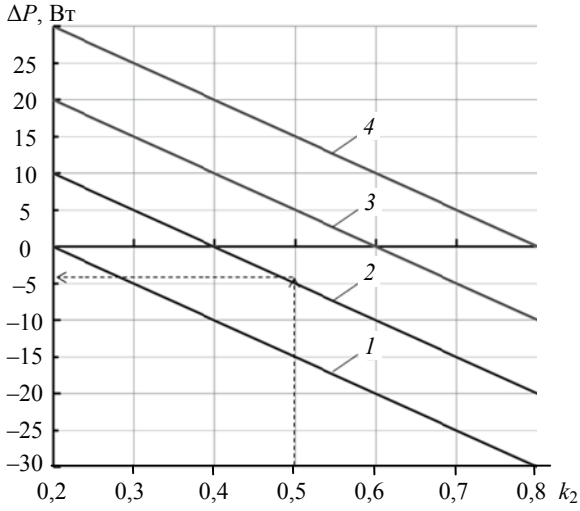


Рис. 3. Расчетные зависимости разности Δ*P* измеряемых мощностей внешних источников 5, 6 от соотношения толщин образцов 2, 3 и образца 1 при различных соотношениях поперечных сечений образцов 2, 3 при k_1:
1 – 0,2; *2* – 0,4; *3* – 0,6; *4* – 0,8

внешних источников теплоты $P_6^{(1)}$ и $P_5^{(1)}$. Далее находят разность указанных мощностей, которая, согласно (1), связана с искомыми теплопроводностями следующим соотношением:

$$P_6^{(1)} - P_5^{(1)} = \frac{\Delta T_1^{(1)} S_1 \left(\lambda_1 (k_1 - k_2) + \lambda_2 (1 - k_1)\right)}{h_1 k_2}. \quad (5)$$

На втором этапе выполняют компарирование образцов 2, 3 и образца 1 по стационарным перепадам температуры на них. Для этого при заданной неизменной и стабилизированной мощности P_4 внутреннего стока теплоты 4, которая использовалась на первом этапе, задают равные мощности внешних источников теплоты, причем делают их равными мощности $P_5^{(1)}$ внешнего источника 5, соприкасающегося с более теплопроводным наибольшим образцом 1. Таким образом, получают равенство мощностей $P_5^{(1)} = P_5^{(2)} = P_6^{(2)}$. Измеряют достигнутый стационарный перепад температуры $\Delta T_1^{(2)}$ на образце 1 и стационарный перепад температуры $\Delta T_{2,3}^{(2)}$ в системе тел «образец 2 – образец 3». Из системы уравнений (1) выражают разность мощностей внешних источников теплоты 6, 5 и приравнивают ее к нулю (так как мощности одинаковые), в результате чего получают уравнение для расчета отношения теплопроводностей λ_2/λ_1:

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{k_2 \Delta T_1^{(2)} - k_1 \Delta T_{2,3}^{(2)}}{(1 - k_1) \Delta T_{2,3}^{(2)}} = N. \quad (6)$$

Затем совместно решают уравнения (5), (6) относительно теплопроводности λ_1 образца 1, в результате получают систему уравнений измерения метода:

$$\begin{cases} \lambda_1 = \dfrac{\left(P_6^{(1)} - P_5^{(1)}\right) h_1 k_2}{\Delta T_1^{(1)} S_1 \left(k_1 - k_2 + N(1 - k_1)\right)}, \ \lambda_2 = N\lambda_1, \\ N = \dfrac{k_2 \Delta T_1^{(2)} - k_1 \Delta T_{2,3}^{(2)}}{(1 - k_1) \Delta T_{2,3}^{(2)}}, \ k_1 = S_3 / S_1, \ k_2 = h_{2,3} / h_1. \end{cases} \quad (7)$$

Пример осуществления первого метода.

Пусть, например, требуется измерить априори неизвестные теплопроводности образцов из стали – образцы 1, 3 с теплопроводностью λ_1 и образца из оргстекла – образец 2 с теплопроводностью λ_2. Ожидаемо, что значения указанных теплопроводностей существенно различаются: теплопроводность стали намного выше теплопроводности оргстекла $\lambda_1 > \lambda_2$. Формируют измерительную ячейку по схеме (см. рис. 1, *а*). При этом предварительно определяют оптимальные размеры образцов 1, 2, 3, для чего выполняют расчет зависимостей разности электрических мощностей $\Delta P = P_6^{(1)} - P_5^{(1)}$ от коэффициента $k_2 = h_{2,3}/h_1$ в диапазоне $0 < k_2 < 1{,}0$ при нескольких разных фиксированных значениях $k_1 = S_3/S_1$, взятого из диапазона $0 < k_1 < 1$. Вид таких зависимостей для рассматриваемого примера представлен на рис. 3. Расчет указанных зависимостей проводят по соотношению (5), в котором используют ожидаемые значения теплопроводностей λ_1 и λ_2. При этом, например, задают следующие исходные расчетные данные:

– принимают размеры образца 1: $h_1 = 20$ мм, $D_1 = 40$ мм, $L_1 = 40$ мм, площадь поперечного сечения $S_1 = D_1 L_1 = 0{,}04 \cdot 0{,}04 = 1{,}6 \cdot 10^{-3}$ м^2;

– стационарный перепад температуры $\Delta T_1^{(1)} = 10$ К;

– ожидаемое значение теплопроводности образцов 1, 3 – $\lambda_1 \approx 30$ Вт/(м·К);

– ожидаемое значение теплопроводности образца 2 – $\lambda_2 \approx 0{,}3$ Вт/(м·К);

– ожидаемое отношение теплопроводностей $N = \lambda_2/\lambda_1 \approx 0{,}01$.

Из указанных зависимостей выбирают такое значение k_2, при котором разность мощностей ΔP будет достаточной для ее точного измерения, при этом одновременно стационарный перепад температуры в системе тел «образец 2 – образец 3», достигаемый на втором этапе измерения, соизмерим с заданным стационарным перепадом температуры на образце 1.

Например, из полученной зависимости на рис. 3 выбирают значение коэффициента k_2, равное $k_2 = 0{,}5$, а значение коэффициента k_1, равное $k_1 = 0{,}4$. Выбранным значениям коэффициентов соответствует разность мощностей ΔP внешних источников теплоты, приблизительно равная $\Delta P \approx -4{,}8$ Вт, что вполне достаточно для ее точного измерения.

Для получения расчетного соотношения для ожидаемого значения перепада температуры используют уравнение из (7)

$$N = \frac{k_2 \Delta T_1^{(2)} - k_1 \Delta T_{2,3}^{(2)}}{(1 - k_1)\Delta T_{2,3}^{(2)}}, \qquad (8)$$

в котором принимают равенство перепадов температур $\Delta T_1^{(1)} = \Delta T_1^{(2)}$ (в рассматриваемом примере $\Delta T_1^{(1)} = \Delta T_1^{(2)} = 10$ К). С учетом принятого, из (8) получают оценку ожидаемого перепада температуры

$$\Delta T_{2,3}^{(2)} = \frac{k_2 \Delta T_1^{(1)}}{k_1 + N(1 - k_1)} = \frac{0{,}5 \cdot 10}{0{,}4 + 0{,}01(1 - 0{,}4)} = 12{,}5 \text{ К}.$$

Полученное значение стационарного перепада температуры $\Delta T_{2,3}^{(2)}$ близко к стационарному перепаду температуры $\Delta T_1^{(1)} = 10$ К на образце 1, что соответствует сформулированному выше требованию.

Исходя из полученных значений коэффициентов k_1 и k_2 с учетом соотношений (7) задают размеры образцов 2, 3:

– образец 2: $h_{2,3} = k_2 h_1 = 10$ мм, $D_2 = 24$ мм, $L_2 = 40$ мм, площадь поперечного сечения $S_2 = D_2 L_2 = 0{,}024 \cdot 0{,}04 = 9{,}6 \cdot 10^{-4}$ м^2;

– образец 3: $h_{2,3} = k_2 h_1 = 10$ мм, $D_3 = 16$ мм, $L_3 = 40$ мм, площадь поперечного сечения $S_3 = k_1 S_2 = D_3 L_3 = 0{,}016 \cdot 0{,}04 = 6{,}4 \cdot 10^{-4}$ м^2.

Согласно заданным размерам изготавливают образцы 1, 2, 3 и собирают измерительную ячейку (см. рис. 1, *а*). Затем, согласно первому этапу, выполняют компарирование образцов 2, 3 и образца 1 по мощности соответствующих им внешних источников теплоты 6, 5. В результате получают значения мощностей внешних источников теплоты, например, равные $P_6^{(1)} = 10$ Вт и $P_5^{(1)} = 14{,}6$ Вт, при которых достигаются одинаковые стационарные перепады температуры образцов 2, 3 и образца 1 $\Delta T_1^{(1)} = \Delta T_1^{(2)} = 10$ К. Затем, согласно второму этапу, выполняют компарирование образцов 2, 3 и образца 1 по их стационарным перепадам температуры. В результате, получают значения достигнутых стационарных перепадов температуры, например, равные $\Delta T_1^{(2)} = 10$ К, $\Delta T_{2,3}^{(2)} = 12{,}3$ К, которые соответствуют равенству мощностей $P_5^{(1)} = P_6^{(2)} = P_5^{(2)}$.

Далее выполняют расчет искомых теплопроводностей, для чего используют систему уравнений (7), получают следующие значения теплопроводностей, Вт/(м·К): стали $\lambda_1 = 30{,}68$, оргстекла $\lambda_2 = 0{,}322$.

Второй метод. Алгоритм вывода уравнения измерения второго метода полностью идентичен первому методу, поэтому в данной статье не приводится. Уравнения измерения второго метода имеют вид:

$$\begin{cases} \lambda_1 = \dfrac{\left(P_5^{(1)} - P_6^{(1)}\right)h_1}{\Delta T_1^{(1)} S\left(k_1 - N\right)}, \quad N = \dfrac{k_1 \Delta T_1^{(2)}}{\Delta T_2^{(2)}}; \\ \lambda_2 = N\lambda_1, \quad k_1 = \ h_2/h_1. \end{cases} \tag{9}$$

Пример реализации второго метода.

Пусть, например, требуется измерить априори неизвестные теплопроводности образца из алюминия – образец 1 с теплопроводностью λ_1 и образца из стали – образец 2 с теплопроводностью λ_2. Ожидаемо, что значения указанных теплопроводностей существенно различаются: теплопроводность алюминия выше теплопроводности стали $\lambda_1 > \lambda_2$. Образцы выполнены в форме параллелепипедов с одинаковым поперечным сечением, но с разной толщиной h. Формируют измерительную ячейку по схеме (см. рис. 1, *б*). При этом предварительно определяют оптимальные размеры образцов 1, 2, для чего выполняют расчет зависимостей разности электрических мощностей $\Delta P = P_5^{(1)} - P_4^{(1)}$ от коэффициента $k_1 = h_2/h_1$ в диапазоне $0 < k_1 < 1{,}0$. Вид данной зависимости для рассматриваемого примера представлен на рис. 4. Расчет зависимости проводят по соотношению (10), в котором используют ожидаемые значения теплопроводностей λ_1 и λ_2. При этом, например, задают следующие исходные расчетные данные:

– принимают размеры образца 1, равные: h_1 = 20 мм – толщина образца 1, D_1 = 40 мм – ширина образца 1, L_1 = 40 мм – длина образца 1, площадь поперечного сечения $S_1 = D_1 L_1 = 0{,}04 \cdot 0{,}04 = 1{,}6 \cdot 10^{-3}$ м^2;

– стационарный заданный перепад температуры $\Delta T_1^{(1)}$ = 10 К;

– ожидаемые значения теплопроводности, Вт/(м·К), образца 1 – $\lambda_1 \approx 200$ и образца 2 – $\lambda_2 \approx 35$;

– ожидаемое отношение теплопроводностей $N = \lambda_2/\lambda_1 \approx 0{,}175$.

$$\left(P_5^{(1)} - P_4^{(1)}\right) = \frac{\Delta T_1^{(1)} S}{h_1}\left(k_1\lambda_1 - \lambda_2\right). \tag{10}$$

По зависимости выбирают такое значение k_1, при котором разность мощностей ΔP будет достаточной для ее точного измерения, и при этом стационарные перепады температуры на образцах 1, 2 достигаемые при равенстве мощностей внешних источников теплоты, будут соизмеримы и достаточны для их точного измерения, но не будут превышать некоторого заданного значения, заданного эксплуатантом метода (см. рис. 4). Например, выбирают значение коэффициента k_1 = 0,35. Выбранному значению коэффициента k_1 соответствует разность мощностей ΔP внешних источников теплоты, приблизительно равная $\Delta P \approx 30$ Вт, что вполне достаточно для ее точного измерения. Для получения расчетного соотношения для ожидаемого значения перепада температуры $\Delta T_2^{(2)}$ используют уравнение из (9):

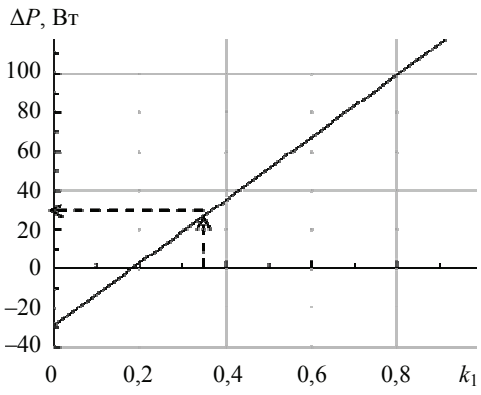


Рис. 4. Пример расчетной зависимости разности мощностей внешних источников теплоты от соотношения толщин образцов

$$N = \frac{k_1 \Delta T_1^{(2)}}{\Delta T_2^{(2)}}, \qquad (11)$$

в котором принимают равенство перепадов температур $\Delta T_1^{(1)} = \Delta T_2^{(1)}$ (в рассматриваемом примере $\Delta T_1^{(1)} = \Delta T_2^{(1)}$ =10 К). С учетом принятого, из (11) получают соотношение для оценки ожидаемого перепада температуры $\Delta T_2^{(2)}$

$$\Delta T_2^{(2)} = \frac{k_1 \Delta T_1^{(2)}}{N} = \frac{0{,}35 \cdot 10}{35/200} = 20 \text{ К}.$$

Полученное значение стационарного перепада температуры $\Delta T_2^{(2)}$ = 20 К соизмеримо со стационарным перепадом температуры $\Delta T_1^{(1)}$ = 10 К на образце 1, что соответствует сформулированному выше требованию. Исходя из выбранного значения коэффициента k_1 с учетом соотношений (9) задают размер образца 2:

– образец 2: $h_2 = k_1 h_1$ = 0,35·20 = 7 мм – толщина образца 2, D_2 = 40 мм – ширина образца 2, L_2 = 40 мм – длина образца 2, $S_2 = D_2 L_2$ = 0,04·0,04 = 1,6·10^{-3} м^2 – площадь поперечного сечения.

Согласно заданным размерам изготавливают образцы 1, 2 и собирают измерительную ячейку (см. рис. 1, *б*). Затем, согласно первому этапу, выполняют компарирование образца 2 и образца 1 по мощности соответствующих им внешних источников теплоты 4, 5, измеряют указанные мощности. В результате получают значения мощностей внешних источников теплоты, Вт, например, $P_5^{(1)}$ = 45,4 и $P_4^{(1)}$ = 14,8, при которых достигаются одинаковые стационарные перепады температуры $\Delta T_1^{(1)} = \Delta T_1^{(2)}$ = 10 К. Затем, согласно второму этапу, выполняют компарирование образца 2 и образца 1 по их стационарным перепадам температуры, которые также измеряют. В результате, получают измеренные значения достигнутых стационарных перепадов температуры, К, например, $\Delta T_1^{(2)}$ = 10 и $\Delta T_2^{(2)}$ = 20,8, которые соответствуют равенству мощностей $P_5^{(2)} = P_6^{(2)} = P_5^{(1)}$. Далее выполняют расчет искомых теплопроводностей, для чего используют систему уравнений (9), получают следующие значения теплопроводностей, Вт/(м·К): стали – λ_2 = 35,4; алюминия – λ_1 = 210,5.

Метод обеспечивает одновременное измерение теплопроводности сразу двух различных по теплофизическим свойствам образцов, то есть обеспечивает операцию кондуктометрического сканирования, что выгодно и существенно отличает его от известных аналогов.

Оценка погрешности методов. Оба метода обеспечивают практически одинаковую точность, поэтому приводится оценка погрешности, выполненная для второго метода.

Наилучшую достижимую относительную погрешность измерения теплопроводности δλ, номинально обеспечиваемую вторым методом, в общем виде оценивают по соотношению

$$\delta\lambda = \left(\left(\delta P_5^{(1)}\right)^2 + \left(\delta P_4^{(1)}\right)^2 + \delta^2\left(\Delta T_1^{(1)}\right) + \delta^2\left(\Delta T_1^{(2)}\right) + \delta^2\left(\Delta T_2^{(2)}\right) + \delta^2 S + \delta^2 h \right)^{1/2}, \qquad (12)$$

где δ – символ, означающий относительную погрешность измерения физической величины.

Основной вклад в погрешность вносит измерение перепада температуры на образцах, остальными составляющими погрешности – погрешностями измерения электрической мощности и размеров образцов можно пренебречь, так как они

не менее чем на порядок ниже погрешности измерения температуры – в настоящее время относительная достигнутая погрешность данных параметров составляет $\delta P_5^{(1)} \approx \delta S \approx \delta h \approx 5 \cdot 10^{-5} = 0{,}005$ %. С учетом этого, соотношение (12) правомерно преобразуют к виду

$$\delta\lambda \approx (3\delta^2(\Delta T_1^{(1)}))^{1/2}. \quad (13)$$

Погрешность измерения перепада температуры определяется относительной погрешностью номинальных статических характеристик используемых контактных термопреобразователей. Так, например, для платиновых термометров сопротивления 1-го разряда расширенная абсолютная неопределенность при 0 °С составляет $\Delta_1 = 0{,}002$ К. Для примера зададим значения измеряемых перепадов температуры $\Delta T = \Delta T_1 = 10$ К. Допустим, что каждый из перепадов температуры измеряется с помощью двух термометров сопротивления. С учетом этого, соотношение (13) трансформируется к виду

$$\delta\lambda \approx \left(6\delta^2(T)\right)^{1/2} = \left(6\delta^2\left(\frac{\Delta_1}{\Delta T}\right)\right)^{1/2},$$

где $\delta(T) = \Delta_1/\Delta T$ – относительная погрешность измерения температуры поверхности образцов. Для принятых исходных данных $\Delta_1 = 0{,}002$ К, $\Delta T = \Delta T_1 = 10$ К получаем $\delta\lambda \approx 4{,}9 \cdot 10^{-4} = 0{,}049$ %.

Заключение

При конкретной реализации методов фактическая погрешность будет всегда выше приведенной оценки и в каждом конкретном случае должна определяться индивидуально в зависимости от качества исполнения устройств, реализующих методы.

Методы одновременно измеряют теплопроводности сразу двух различных по теплофизическим свойствам образцов, то есть обеспечивают операцию точного кондуктометрического сканирования, что выгодно и существенно отличает их от известных аналогов.

Список литературы

1. Теплофизические измерения : учеб. пособие / Е. С. Платунов, И. В. Баранов, С. Е. Буравой, В. В. Курепин ; под ред. Е. С. Платунова. – СПб. : СПбГНиПТ, 2010. – 738 с.

2. Пономарев, С. В. Устройство для измерения теплофизических свойств веществ методами регулярных режимов / С. В. Пономарев, С. В. Мищенко // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2021. – Т. 27, № 1. – С. 6 – 13. doi: 10.17277/vestnik.2021.01.pp.006-013.

3. Балабанов, П. В. Теоретические и практические аспекты измерения теплофизических свойств гетерогенных материалов : монография / П. В. Балабанов, А. П. Савенков. – Тамбов : ТГТУ, 2016. – 188 с.

4. Пономарев, С. В. Теоретические и практические аспекты теплофизических измерений : монография в 2 кн. / С. В. Пономарев, С. В. Мищенко, А. Г. Дивин. – Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2006. – Кн. 1. – 204 с.

5. Теоретические и практические основы теплофизических измерений / Под ред. С. В. Пономарева. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 408 с.

6. Пат. 2613194 Российская Федерация, МПК G01N 25/18. Способ измерения теплофизических свойств анизотропных материалов методом линейного импульсного источника теплоты / С. В. Пономарев, О. В. Буланова, А. Г. Дивин, Е. В. Буланов, Г. В. Шишкина ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ТГТУ». – № 2015147065 ; заявл. 02.11.2015 ; опубл. 15.03.2017, Бюл. № 8. – 21 с.

7. Пат. 2276781 Российская Федерация, МПК G01N 25/00. Способ определения теплопроводности материалов / Н. А. Соколов ; заявитель и патентообладатель ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева». – № 2004133748 ; заявл. 16.11.2004 ; опубл. 20.05.2006, Бюл. № 14. – 7 с.

8. Пат. 2749642 Российская Федерация, МПК G01N 25/18. Абсолютный способ дифференциально-сканирующей кондуктометрии разнородных твердых материалов / В. П. Ходунков, Ю. П. Заричняк ; заявитель и патентообладатель ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева». – № 2020138458 ; заявл. 23.11.2020 ; опубл. 16.06.2021, Бюл. № 17. – 17 с.

9. Пат. 2755090 Российская Федерация, МПК G01N 25/18. Абсолютный способ дифференциально-сканирующей тепловой кондуктометрии / В. П. Ходунков, Ю. П. Заричняк ; заявитель и патентообладатель ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева». – № 2020138452 ; заявл. 23.11.2020 ; опубл. 13.09.2021, Бюл. № 26. – 15 с.

10. Фокин, В. М. Основы технической теплофизики / В. М. Фокин, Г. П. Бойков, Ю. В. Видин. – М. : Машиностроение-1, 2004. – 172 с.

New Stationary Methods for Measuring the Thermal Conductivity of Solids

V. P. Khodunkov[1], Yu. P. Zarichnyak[2]

Information and Analytical Department, walkerearth@mail.ru;
D. I. Mendeleev All-Russian Research Institute of Metrology (1),
St. Petersburg, Russia;
Faculty of Energy and Environmental Technologies (2), National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, St. Petersburg, Russia

Keywords: absolute method; differential scanning; conductometry; heterogeneous material; aggregate measurement; thermal conductivity; electrothermal analogy; reference.

Abstract: Two stationary methods for measuring the thermal conductivity of solids are considered and their theoretical justification is given. The principal block diagrams of the devices realizing them are shown. The expected accuracy provided by these methods is estimated.

References

1. Platunov Ye.S. [Ed.], Baranov I.V., Buravoy S.Ye., Kurepin V.V. *Teplofizicheskiye izmereniya: uchebnoye posobiye* [Thermophysical measurements: textbook], St. Petersburg: SPbGUNiPT, 2010, 738 p. (In Russ.)

2. Ponomarev S.V., Mishchenko S.V. [Device for measuring the thermophysical properties of substances by regular regimes], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2021, vol. 27, no. 1, pp. 6-13, doi: 10.17277/vestnik.2021.01.pp.006-013. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Balabanov P.V., Savenkov A.P. *Teoreticheskiye i prakticheskiye aspekty izmereniya teplofizicheskikh svoystv geterogennykh materialov: monografiya* [Theoretical and practical aspects of measuring the thermophysical properties of heterogeneous materials: monograph], Tambov: TGTU, 2016, 188 p. (In Russ.)

4. Ponomarev S.V., Mishchenko S.V., Divin A.G. *Teoreticheskiye i prakticheskiye aspekty teplofizicheskikh izmereniy: monografiya v 2 kn.* [Theoretical and practical aspects of thermophysical measurements: monograph in 2 books], Tambov: Izdatel'stvo TGTU, 2006, Book 1, 204 p. (In Russ.)

5. Ponomarev S.V. [Ed.] *Teoreticheskiye i prakticheskiye osnovy teplofizicheskikh izmereniy* [Theoretical and practical foundations of thermophysical measurements], Moscow: FIZMATLIT, 2008, 408 p. (In Russ.)

6. Ponomarev S.V., Bulanova O.V., Divin A.G., Bulanov Ye.V., Shishkina G.V. *Sposob izmereniya teplofizicheskikh svoystv anizotropnykh materialov metodom lineynogo impul'snogo istochnika teploty* [Method for measuring the thermophysical properties of anisotropic materials by the method of a linear pulsed heat source], Russian Federation, 2017, Pat. 2613194. (In Russ.)

7. Sokolov N.A. *Sposob opredeleniya teploprovodnosti materialov* [A method for determining the thermal conductivity of materials], Russian Federation, 2006, Pat. 2276781. (In Russ.)

8. Khodunkov V.P., Zarichnyak Yu.P. *Absolyutnyy sposob differentsial'no-skaniruyushchey konduktometrii raznorodnykh tverdykh materialov* [Absolute method of differential-scanning conductometry of heterogeneous solid materials], Russian Federation, 2021, Pat. 2749642. (In Russ.)

9. Khodunkov V.P., Zarichnyak Yu.P. *Absolyutnyy sposob differentsial'no-skaniruyushchey teplovoy konduktometrii* [Absolute method of differential-scanning thermal conductometry], Russian Federation, 2021, Pat. 2755090. (In Russ.)

10. Fokin V.M., Boykov G.P., Vidin Yu.V. *Osnovy tekhnicheskoy teplofiziki* [Fundamentals of technical thermophysics], Moscow: Mashinostroyeniye-1, 2004, 172 p. (In Russ.)

Neue stationäre Messverfahren der Wärmeleitfähigkeit von Festkörpern

Zusammenfassung: Es sind zwei stationäre Methoden zur Messung der Wärmeleitfähigkeit von Festkörpern betrachtet und ihre theoretische Begründung ist gegeben. Die prinzipiellen Blockdiagramme der Geräte, die sie implementieren, sind gezeigt. Die erwartete Genauigkeit dieser Methoden ist ausgewertet.

Nouvelles méthodes stationnaires de la mesure de la conductivité thermique des solides

Résumé: Sont examinées deux méthodes stationnaires de la mesure de la conductivité thermique des solides théorique, est donnée leur justification. Sont montrés les schémas structurels du principe des dispositifs qui les réalisent. Est évaluée la précision attendue fournie par ces méthodes.

Авторы: ***Ходунков Вячеслав Петрович*** **–** кандидат технических наук, старший научный сотрудник, аналитик, Информационно-аналитический отдел, отдел эталонов и научных исследований в области термодинамики, ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева», Санкт-Петербург, Россия; ***Заричняк Юрий Петрович*** – доктор физико-математических наук, профессор, доцент факультета энергетики и экотехнологий, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», Санкт-Петербург, Россия.

УДК 66.011 : 631.8
DOI: 10.17277/vestnik.2022.03.pp.466-475

КИНЕТИКА ВЫСВОБОЖДЕНИЯ ПИТАТЕЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ ИЗ ГРАНУЛ NPK-УДОБРЕНИЯ С ПОЛИМЕРНЫМ ПОКРЫТИЕМ

А. А. Липин, А. Г. Липин

Кафедра «Процессы и аппараты химической технологии», piaxt@isuct.ru; ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», Иваново, Россия

Ключевые слова: диффузия; капсулирование; кинетика высвобождения; моделирование; полимерное покрытие; NPK-удобрения.

Аннотация: Представлены результаты исследования кинетики выделения питательных веществ из капсулированных гранул NPK-удобрения. Установлены характер и продолжительность выделения питательных веществ из капсулированных гранул с различной толщиной оболочки. Предложена математическая модель процесса высвобождения питательных веществ из гранул с полимерным покрытием, позволяющая оперативно прогнозировать его продолжительность. Выполнена проверка адекватности предложенной математической модели опытным данным. Сопоставлены расчетные и экспериментальные значения степени выделения питательных веществ из капсулированных гранул.

Обозначения

B – степень выделения;

C, $C_{гр}$, $C_{ж}$ – концентрации питательных веществ в оболочке, внутри капсулы и в окружающей гранулу жидкости соответственно, кг/м^3;

$C_{нас}$ – концентрация насыщенного раствора NPK-удобрения, кг/м^3;

D_{NPK} – эффективный коэффициент диффузии питательных веществ через слой покрытия, м^2/с;

D_W – коэффициент диффузии питательных веществ в воде, м^2/с;

$d_к$ – диаметр капсулы, м;

j_{NPK} – плотность массового потока питательных веществ в окружающую гранулу жидкость, кг/(м^2·с);

$N_э$ – число экспериментальных значений;

$R_к$, $R_я$ – радиусы капсулы и ядра гранулы соответственно, м;

r – координата по радиусу, м;

Sh – критерий Шервуда;

$V_ж$ – объем окружающей гранулу жидкости, м^3;

$V_я$ – объем ядра гранулы, м^3;

$N_{гр}$ – число гранул;

β – коэффициент массоотдачи, м/с;

$\delta_п$ – толщина покрытия, м;

ε – коэффициент распределения;

$\rho_{тв}$ – плотность ядра гранулы, кг/м^3;

τ – время, с

Введение

Рост населения во всем мире значительно увеличил спрос на продовольствие и, чтобы удовлетворить его, необходима большая площадь плодородных земель. Однако такие факторы, как индустриализация, деградация почв и урбанизация, значительно сократили площадь сельскохозяйственных земель. Для получения больших объемов урожая в условиях ограниченных площадей плодородных земель требуется большое количество удобрений. Недостаток обычных удобрений – быстрое высвобождение питательных веществ, что может привести к их потерям вследствие испарения, выщелачивания. Кроме того, растения в начальной стадии развития не могут усвоить все поступающие с удобрениями питательные вещества, поэтому их избыток вымывается в грунт, вызывая эвтрофикацию почвы [1 – 4].

Один из вариантов повышения эффективности удобрений и снижения токсичности почвы – использование удобрений с регулируемым высвобождением питательных веществ (*англ.* Controlled Release Fertilizer (**CRF**)) [1 – 5]. К такому типу удобрений относится, например, NPK-удобрение, покрытое полимерной оболочкой [6]. Потенциальным преимуществом удобрений с контролируемым высвобождением является возможность регулировать скорость и продолжительность высвобождения питательных веществ, чтобы их можно было применять один раз в год для обеспечения потребности в питательных веществах в течение всего годового вегетационного периода [3 – 5]. Продолжительность высвобождения питательных веществ может варьироваться в течение нескольких месяцев в зависимости от характеристик покрытия и продолжительности роста урожая.

Проверка характера высвобождения питательных веществ из CRF имеет решающее значение при оценке эффективности удобрений для обеспечения растений питательными веществами в соответствии с потребностями культуры и продолжительностью роста культуры. Высвобождение питательных веществ из CRF-удобрений в значительной степени зависит от характеристик материалов покрытия, его толщины и температуры [7]. Несмотря на то что в прошлом разрабатывалось множество моделей прогнозирования и методов оценки высвобождения питательных веществ [8 – 12], на сегодняшний день не существует согласованного и стандартизированного метода. Актуальной остается задача разработки метода прогнозирования кинетики выделения питательных веществ на базе достаточно простой математической модели процесса, отражающей его основные особенности и требующей экспериментального определения минимального числа параметров модели.

Экспериментальное исследование кинетики выделения питательных веществ из капсулированных гранул

Для исследования кинетики выделения питательных веществ из CRF использовались гранулы NPK-удобрения с покрытием из акрилового полимера. Капсулирование гранулированного NPK-удобрения проводилось в лабораторном аппарате с псевдоожиженным слоем частиц [13]. Нанесение защитной оболочки осуществлялось путем распыливания на частицы кипящего слоя эмульсии полимера. Капли, столкнувшись с частицами слоя, растекаются по их поверхности, образуя жидкостную пленку, при этом растворитель постоянно испаряется. Оставшийся твердый компонент осаждается на поверхности частиц и образует оболочку. Применялся режим фонтанирующего слоя, обеспечивающий интенсивную циркуляцию частиц. Таким образом, создавались условия для многократного прохождения каждой частицы через зону орошения форсунки, что способствовало равномерному распределению пленкообразующего вещества по поверхности обрабатываемых гранул [14, 15].

Процесс капсулирования осуществлялся в аппарате кипящего слоя цилиндроконической формы с диаметром решетки 70 мм; высота конической части аппарата 400 мм; диаметр верхней части 210 мм. Тонкодисперсный распыл эмульсии полимера обеспечивался пневматической форсункой, установленной в нижней части аппарата.

Получены образцы капсулированного в полимерную оболочку NPK-удобрения с содержанием покрытия от общей массы гранул 13, 16, 20, 23, 26 %. На рисунке 1 приведена фотография среза гранулы, полученная на электронном сканирующем микроскопе TESCAN VEGA3 с увеличением ×88. Хорошо видна оболочка, нанесенная на ядро гранулы. Содержание полимерного покрытия 26 %. В слое покрытия нет дефектов, толщина покрытия достаточно равномерная, среднее значение толщины слоя покрытия 0,194 мм.

Тесты на выделение питательных веществ из гранул NPK-удобрения с полимерным покрытием проводились в водной среде в статическом режиме. Пять грамм капсулированных гранул помещались в 50 мл дистиллированной воды. В определенные моменты времени отбирались пробы раствора (по 1 мл) и заменялись свежей водой. В отобранных пробах определялась концентрация высвобождающихся питательных веществ рефрактометрическим методом. Измерялся показатель преломления раствора на рефрактометре ИРФ-454 Б2М, после чего по калибровочному графику определялась концентрация питательных веществ в растворе. Калибровочным служил график зависимости показателя преломления от концентрации водного раствора удобрения. Для построения данной зависимости использовались результаты измерения показателя преломления у специально приготовленных растворов NPK-удобрения известных концентраций. Соотношение текущей концентрации и максимально возможной при полном растворении ядра гранулы характеризует степень выделения питательных веществ из капсулированных гранул.

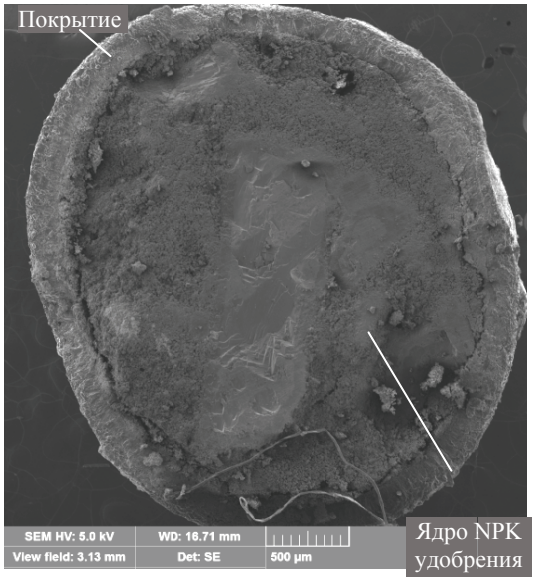


Рис. 1. SEM-изображение среза капсулированной гранулы NPK-удобрения

Результаты экспериментов и их обсуждение

Графики рис. 2 характеризуют кинетику выделения питательных веществ в воде из капсулированных гранул NPK-удобрения, отличающихся разной массовой долей оболочки.

Для гранул с массовой долей оболочки 13 % (толщина покрытия 0,06 мм) индукционный период составил 1 сутки, степень выделения за 30 суток – 0,70; с массовой долей оболочки 16 % (толщина покрытия 0,08 мм) индукционный период – 5 суток, степень выделения за 30 – 0,58; с массовой долей оболочки 20 % (толщина покрытия 0,10 мм) индукционный период – 10 суток, степень выделения за 30 суток – 0,18; с массовой долей оболочки 23 % (толщина покрытия 0,13 мм) индукционный период – 18 сут., степень выделения за 30 суток – 0,035.

Таким образом, с ростом толщины покрытия форма кривой выделения питательных веществ изменяется. Увеличивается продолжительность периода задержки выделения (индукционного), во время которого происходит пропитка слоя покрытия влагой. После накопления достаточного количества воды в грануле начинается выделение питательных веществ по диффузионному механизму. На графиках зависимости степени выделения от времени имеется прямой участок, соответствующий постоянной скорости процесса. В этот период происходит растворение твердого ядра, которое окружено слоем насыщенного раствора питательных веществ. Устанавливается равновесие между диффузионными потоками воды внутрь гранулы и питательных веществ в окружающий гранулу раствор. Нелинейные участки кривых *1*, *2* соответствуют периоду убывающей скорости процесса (см. рис. 2). В период убывающей скорости твердое ядро уже отсутствует, и концентрация раствора питательных веществ внутри капсулы уменьшается, что приводит к снижению движущей сила процесса.

Однако экспериментальная проверка характера высвобождения питательных веществ и общей продолжительности действия удобрения занимает много времени, поскольку продолжительность высвобождения для большинства CRF составляет от 3 до 6 месяцев. Отсюда возникает необходимость быстрой оценки продолжительности высвобождения питательных веществ из капсулированных удобрений. Желательно иметь математическую модель, позволяющую прогнозировать продолжительность выделения питательных веществ из CRF после наблюдения за процессом в течение короткого периода времени (по сравнению с ожидаемым сроком действия).

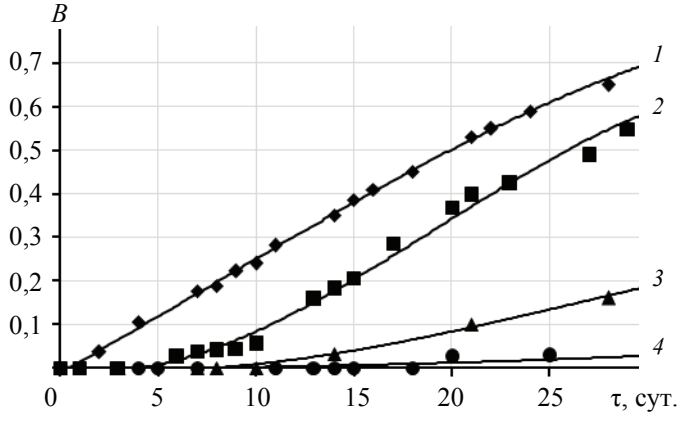


Рис. 2. Зависимость степени выделения питательных веществ от времени процесса при массовой доле оболочки, %:
1 – 13; *2* – 16; *3* – 20; *4* – 23

Математическая модель процесса выделения питательных веществ из капсулированной гранулы

Выделение питательных веществ начинается после завершения периода пропитки полимерного покрытия водой и образования на его внутренней стороне пленки насыщенного раствора питательных веществ с концентрацией $C_{нас}$, кг/м^3 (рис. 3). Индукционный период не являлся предметом данного исследования. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что его продолжительность мала по сравнению с общим временем высвобождения питательных веществ из капсулированной гранулы (см. рис. 2).

Процесс переноса питательных веществ через слой полимерного покрытия ядра гранулы в раствор описывается дифференциальным уравнением диффузии (1) с граничными условиями первого и третьего рода соответственно на внутренней и наружной поверхностях. Из-за малой толщины слоя покрытия, по сравнению с размерами ядра ($\delta_п << R_я$), он рассматривается как плоская пластина

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D_{\text{NPK}} \frac{\partial^2 C}{\partial r^2}, \quad R_я < r < R_к . \tag{1}$$

Граничное условие для уравнения (1) при $r = R_я$ записывается в предположении, что на внутренней поверхности покрытия устанавливается равновесное значение концентрации питательных веществ:

$$C(R_я, \tau) = \varepsilon\, C_{нас} \text{ при } C_{гр} \geq C_{нас} ; \tag{2}$$

$$C(R_я, \tau) = \varepsilon\, C_{гр} \text{ при } C_{гр} < C_{нас} . \tag{3}$$

Предположение основано на том, что перенос компонентов в растворе осуществляется значительно быстрее, чем в слое покрытия. Суммарный процесс переноса лимитирован переносом в слое покрытия. Соотношение (2) имеет место при наличии твердого ядра в период растворения, а соотношение (3) после растворения твердого ядра. Коэффициент распределения ε характеризует долю пустот в слое покрытия, заполненных жидкостью (раствором NPK-удобрения).

На наружной поверхности покрытия предполагается массообмен по закону массоотдачи

$$-D_{\text{NPK}} \frac{\partial C(R_к, \tau)}{\partial r} = \beta \left[\frac{C(R_к, \tau)}{\varepsilon} - C_ж \right] = j_{\text{NPK}} . \tag{4}$$

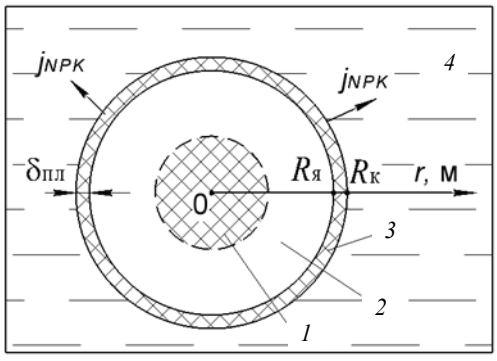


Рис. 3. Расчетная схема:
1 – твердое ядро; *2* – насыщенный раствор; *3* – слой покрытия; *4* – окружающая жидкость

В теории массопередачи показано [16], что для неподвижных частиц критерий Шервуда $\mathrm{Sh} = \frac{\beta d_{\text{к}}}{D_{\text{w}}} = 2$. Следовательно, $\beta = \frac{2D_{\text{w}}}{d_{\text{к}}} = \frac{D_{\text{w}}}{\mathrm{R}_{\text{к}}}$.

Концентрация питательных веществ в окружающей жидкости находится из уравнения

$$V_{\text{ж}} \frac{\partial C_{\text{ж}}}{\partial \tau} = 4\pi R_{\text{к}}^2 N_{\text{гр}} j_{\text{NPK}} \,. \tag{5}$$

Для определения границ разных периодов процесса выделения питательных веществ используется условная величина концентрации питательных веществ внутри капсулы $C_{\text{гр}}$

$$\frac{\partial C_{\text{гр}}}{\partial \tau} = \frac{4\pi R_{\text{к}}^2 j_{\text{NPK}}}{V_{\text{я}}} \,. \tag{6}$$

Начальные условия для уравнений (5) и (6): $C_{\text{ж}} = 0$ и $C_{\text{гр}} = \rho_{\text{тв}}$ при $\tau = 0$. По физическому смыслу $C_{\text{гр}}$ – отношение массы NPK-удобрения внутри капсулы к начальному объему ядра.

Таким образом, система уравнений (1) – (6) представляет собой математическую модель процесса выделения питательных веществ из капсулированной гранулы NPK-удобрения в водной среде. Для решения системы уравнений математического описания использовался метод конечных разностей. Программная реализация модели выполнена в системе MathCAD.

Параметрическая идентификация и проверка адекватности математической модели

На первом этапе моделирования процесса выделения питательных веществ из капсулированных гранул проводилась параметрическая идентификация математической модели. Путем решения обратной задачи определялось значение эффективного коэффициента диффузии питательных веществ через капсулу, обеспечивающее хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных. На втором этапе проводилось прогнозирование хода процесса на более длительном интервале времени.

Для ряда значений эффективного коэффициента диффузии питательных веществ через капсулу D_{NPK} реализовывалось решение системы уравнений (1) – (6) математического описания. Далее для каждого варианта рассчитывалось среднеквадратичное отклонение опытных значений степени выделения $B_{\text{э}\,i}$ от расчетных B_i

$$f(D_{\text{NPK}}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{э}}} \left(B_{\text{э}\,i} - B_i\right)^2}{N_{\text{э}}}} \,. \tag{7}$$

Значение D_{NPK}, доставляющее минимум функции $f(D_{\text{NPK}})$, использовалось далее для прогнозных расчетов. Для процедуры параметрической идентификации модели взяты экспериментальные данные по кинетике выделения питательных веществ из капсулированных гранул (см. рис. 2). Значение эффективного коэффициента диффузии D_{NPK} составило $9{,}5 \cdot 10^{-13}$ м^2/с. На рисунке 4 приведены

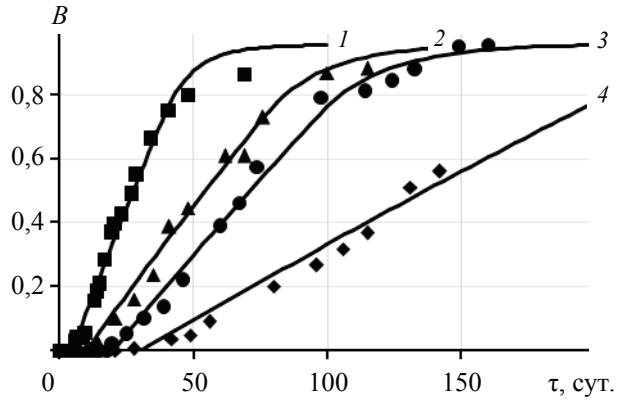


Рис. 4. Изменение степени выделения питательных веществ из капсулированных гранул во времени при массовой доле оболочки, %:
1 – 16; *2* – 20; *3* – 23; *4* – 26

зависимости степени выделения питательных веществ от времени процесса для гранул с различной массовой долей покрытия на значительно большем интервале времени, чем экспериментальные данные, использованные для идентификации эффективного коэффициента диффузии. Непрерывные линии – прогноз по математической модели, точки соответствуют экспериментальным данным. Сопоставление расчетных и экспериментальных значений степени выделения питательных веществ из капсулированных гранул показывает их хорошее соответствие. Среднеквадратичная ошибка составила 0,018; 0,010; 0,013; 0,014 для гранул с массовой долей оболочки, %, соответственно 16; 20; 23; 26.

Заключение

Разработана математическая модель процесса высвобождения питательных веществ из гранул с полимерным покрытием. Модель описывает весь период процесса выделения и отражает влияние размера гранул и толщины слоя покрытия на кинетику процесса выделения питательных веществ из капсулированных гранул NPK-удобрения. Предложенная модель может быть использована для оперативного прогнозирования сроков высвобождения питательных веществ из капсулированных гранул, поскольку продолжительность высвобождения для большинства CRF составляет от 3 до 6 месяцев и экспериментальная проверка общей продолжительности действия удобрения затруднительна. Выполнена проверка адекватности предложенной математической модели опытным данным. Для этого проведены эксперименты по капсулированию гранул NPK-удобрения в полимерные оболочки различной толщины. Сопоставление расчетных и экспериментальных значений степени выделения питательных веществ из капсулированных гранул показало их хорошее соответствие. Среднеквадратичная ошибка не превышала 0,018.

Исследование проведено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ (при поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2021-671).

Список литературы

1. A Review of Mathematical Modeling and Simulation of Controlled-Release Fertilizers / S. A. Irfan, R. Razali, K. KuShaari [et al.] // J. Controlled Release. – 2018. – Vol. 271. – P. 45 – 54. doi: 10.1016/j.jconrel.2017.12.017

2. Lawrencia, D. Controlled Release Fertilizers: A Review on Coating Materials and Mechanism of Release / D. Lawrencia, S. K. Wong, D. Y. S. Low [et al.] // Plants. – 2021. – Vol. 10, No. 2. – Art. 238. doi: 10.3390/plants10020238

3. Timilsena, Y. P. Enhanced Efficiency Fertilisers: a Review of Formulation and Nutrient Release Patterns / Y. P. Timilsena, R. Adhikari, P. Casey [et al.] // J. Sci. Food Agr. – 2015. – Vol. 95, No. 6. – P. 1131 – 1142. doi: 10.1002/jsfa.6812

4. Shaviv, A. Advances in Controlled-Release Fertilizers / A. Shaviv // Advances in Agronomy. – 2001. – Vol. 71. – P. 1 – 49. doi: 10.1016/S0065-2113(01)71011-5

5. Липин, А. Г. Капсулирование гранул в полимерные оболочки как метод создания минеральных удобрений с регулируемой скоростью высвобождения питательных веществ / А. Г. Липин, В. О. Небукин, А. А. Липин // Соврем. науко-емкие технологии. Региональное приложение. – 2017. – № 3 (51). – С. 86 – 91.

6. A Rapid Technique for Prediction of Nutrient Release from Polymer Coated Controlled Release Fertilizers / Sh. Wang, A. K. Alva, Yu. Li, M. Zhang // Open Journal of Soil Science. – 2011. – Vol. 1, No. 2. – P. 40 – 44. doi: 10.4236/ojss.2011.12005

7. Одинцов, А. В. Оценка пролонгирующего эффекта композиционных оболочек гранул минерального удобрения / А. В. Одинцов, А. Г. Липин, Н. Д. Туркова // Известия вузов. Химия и хим. технология. – 2010. – Т. 53, № 8. – С. 68 – 70.

8. Al-Zahrani, S. M. Controlled-Release of Fertilizers: Modeling and Simulation / S. M. Al-Zahrani // Int. J. Eng. Sci. – 1998. – Vol. 37, No. 10. – P. 1299 – 1307.

9. Shaviv, A. Modeling Controlled Nutrient Release from a Population of Polymer Coated Fertilizers: Statistically Based Model for Diffusion Release / A. Shaviv, S. Raban, E. Zaidel // Environ. Sci. Technol. – 2003. – Vol. 37, No. 10. – P. 2257 – 2261.

10. Prediction of Nitrate Release from Polymer-Coated Fertilizers Using an Artificial Neural Network Model / C. Du, D. Tang, J. Zhou [et al.] // Bioprocesses and Biosystems. – 2007. – Vol. 99, No. 4. – P. 478 – 486.

11. Mathematical Modeling of Nutrient Release from Capsulated Fertilizers / V. Vakal, I. Pavlenko, S. Vakal [et al.] // Periodica Polytechnica Chemical Engineering. – 2020. – Vol. 64, No. 4. – P. 562 – 568.

12. Mathematical Model for Potassium Release from Polymer-coated Fertiliser / C. Du, J. Zhou, A. Shaviv, H. Wang // Biosystems Engineering. – 2004. – Vol. 88, No. 3. – P. 395 – 400.

13. Lipin, A. G. Calculation of Degree of Coverage in Fluidized Bed Coating / A. G. Lipin, A. A. Lipin, R. Wójtowicz // Drying Technology. – 2022. – Vol. 40, No. 1. – P. 30 – 41. doi: 10.1080/07373937.2020.1777153

14. Lipin, A. A. Prediction of Coating Uniformity in Batch Fluidized-Bed Coating Process / A. A. Lipin, A. G. Lipin // Particuology. – 2022. – Vol. 61. – P. 41 – 46. doi: 10.1016/j.partic.2021.03.010

15. Липин, А. Г. Оценка степени покрытия при капсулировании зернистых материалов в псевдоожиженном слое / А. Г. Липин, В. О. Небукин, А. А. Липин // Известия вузов. Химия и хим. технология. – 2019. – Т. 62, № 5. – С. 84 – 90. doi: 10.6060/ivkkt201962fp.5793

16. Берд, Р. Явления переноса / Р. Берд, В. Стьюарт, Е. Лайтфут ; пер. с англ. Н. Н. Кулова, В. С. Крылова ; под ред. Н. М. Жаворонкова, В. А. Малюсова. – М. : Химия, 1974. – 688 с.

Kinetics of Nutrient Release from Polymer Coated NPK Fertilizer Granules

A. A. Lipin, A. G. Lipin

Department of Processes and Apparatuses of Chemical Technology, piaxt@isuct.ru; Ivanovo State Chemical-Technological University, Ivanovo, Russia

Keywords: diffusion; encapsulation; release kinetics; modeling; polymer coating; NPK fertilizers.

Abstract: The results of a study of the kinetics of nutrient release from encapsulated NPK fertilizer granules are presented. The nature and duration of the release of nutrients from encapsulated granules with different shell thicknesses have been established. A mathematical model of the process of releasing nutrients from polymer-coated granules is proposed, which makes it possible to quickly predict its duration. The adequacy of the proposed mathematical model to experimental data has been verified. The calculated and experimental values of the degree of release of nutrients from encapsulated granules are compared.

References

1. Irfan S.A., Razali R., KuShaari K., Mansor N., Azeem B., Ford Versypt A.N. A Review of Mathematical Modeling and Simulation of Controlled-Release Fertilizers, *J. Controlled Release*, 2018, vol. 271, pp. 45-54, doi: 10.1016/j.jconrel.2017.12.017

2. Lawrencia D., Wong S.K., Low D.Y.S. [et al.] Controlled Release Fertilizers: A Review on Coating Materials and Mechanism of Release, *Plants*, 2021, vol. 10, no. 2, art. 238, doi: 10.3390/plants10020238

3. Timilsena Y.P., Adhikari R., Casey P., Muster T., Gill H., Adhikari B. Enhanced Efficiency Fertilisers: a Review of Formulation and Nutrient Release Patterns, *J. Sci. Food Agr.*, 2015, vol. 95, no. 6, pp. 1131-1142, doi: 10.1002/jsfa.6812

4. Shaviv A. Advances in Controlled-Release Fertilizers, *Advances in Agronomy*, 2001, vol. 71, pp. 1-49, doi: 10.1016/S0065-2113(01)71011-5

5. Lipin A.G., Nebukin V.O., Lipin A.A. [Encapsulation of granules in polymer shells as a method for creating mineral fertilizers with a controlled release rate of nutrients], *Sovremennyye naukoyemkiye tekhnologii. Regional'noye prilozheniye* [Modern high-tech technologies. Regional application], 2017, no. 3 (51), pp. 86-91. (In Russ., abstract in Eng.)

6. Wang Sh., Alva A.K., Li Yu., Zhang M. A Rapid Technique for Prediction of Nutrient Release from Polymer Coated Controlled Release Fertilizers, *Open Journal of Soil Science*, 2011, vol. 1, no. 2, pp. 40-44, doi: 10.4236/ojss.2011.12005

7. Odintsov A.V., Lipin A.G., Turkova N.D. [Evaluation of the prolonging effect of composite shells of mineral fertilizer granules], *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [Proceedings of the Universities. Chemistry and chemical technology], 2010, vol. 53, no. 8, pp. 68-70. (In Russ.)

8. Al-Zahrani S.M. Controlled-Release of Fertilizers: Modeling and Simulation, *Int. J. Eng. Sci.*, 1998, vol. 37, no. 10, pp. 1299-1307.

9. Shaviv A., Raban S., Zaidel E. Modeling Controlled Nutrient Release from a Population of Polymer Coated Fertilizers: Statistically Based Model for Diffusion Release, *Environ. Sci. Technol.*, 2003, vol. 37, no. 10, pp. 2257-2261.

10. Du C., Tang D., Zhou J., Wang H., Shaviv A. Prediction of Nitrate Release from Polymer-Coated Fertilizers Using an Artificial Neural Network Model, *Bioprocesses and Biosystems*, 2007, vol. 99, no. 4, pp. 478-486.

11. Vakal V., Pavlenko I., Vakal S., Hurets L., Ochowiak M. Mathematical Modeling of Nutrient Release from Capsulated Fertilizers, *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 2020, vol. 64, no. 4, pp. 562-568.

12. Du C., Zhou J., Shaviv A., Wang H.Mathematical Model for Potassium Release from Polymer-coated Fertiliser, *Biosystems Engineering*, 2004, vol. 88, no. 3, pp. 395-400.

13. Lipin A.G., Lipin A.A., Wójtowicz R. Calculation of Degree of Coverage in Fluidized Bed Coating, *Drying Technology*, 2022, vol. 40, no. 1, pp. 30-41, doi: 10.1080/07373937.2020.1777153

14. Lipin A.A., Lipin A.G. Prediction of Coating Uniformity in Batch Fluidized-Bed Coating Process, *Particuology*, 2022, vol. 61, pp. 41-46, doi: 10.1016/j.partic.2021.03.010

15. Lipin A.G., Nebukin V.O., Lipin A.A. [Estimation of the degree of coverage during encapsulation of granular materials in a fluidized bed], *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [Proceedings of the Universities. Chemistry and chemical technology], 2019, vol. 62, no. 5, pp. 84-90, doi: 10.6060/ivkkt201962fp.5793 (In Russ., abstract in Eng.)

16. Berd R., St'yuart V., Laytfut Ye., Zhavoronkov N.M., Malyusov V.A. [Eds.] *Yavleniya perenosa* [Transfer Phenomena], Moscow: Khimiya, 1974, 688 p. (In Russ.)

Kinetik der Nährstofffreisetzung aus NPK-Granulat-polymerbeschichtetem Dünger

Zusammenfassung: Es sind die Ergebnisse einer Studie zur Kinetik der Nährstofffreisetzung aus eingekapselten NPK-Düngemittelgranulaten vorgestellt. Art und Dauer der Freisetzung von Nährstoffen aus eingekapselten Granulaten mit unterschiedlichen Schalendicken sind ermittelt. Es ist ein mathematisches Modell des Prozesses der Freisetzung von Nährstoffen aus polymerbeschichteten Granulaten vorgeschlagen, das es ermöglicht, seine Dauer schnell vorherzusagen. Die Eignung des vorgeschlagenen mathematischen Modells für experimentelle Daten ist verifiziert. Die berechneten und experimentellen Werte des Freisetzungsgrades von Nährstoffen aus eingekapselten Granulaten sind verglichen.

Cinétique de la libération des nutriments à partir des granulés d'engrais NPK revêtus de polymère

Résumé: Sont présentés les résultats d'une étude sur la cinétique d'excrétion des nutriments à partir de granulés d'engrais NPK encapsulés. Sont établies la nature et la durée de la libération des nutriments à partir des granules encapsulés avec de différentes épaisseurs de coque. Est proposé un modèle mathématique du processus de la libération des nutriments à partir des granulés revêtus de polymère permettant de prédire rapidement sa durée. Est vérifiée l'adéquation du modèle mathématique proposé aux données expérimentales. Sont comparées les valeurs calculées et celles expérimentales du degré d'excrétion des nutriments à partir des granulés encapsulés.

Авторы: ***Липин Андрей Александрович*** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Процессы и аппараты химической технологии»; ***Липин Александр Геннадьевич*** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Процессы и аппараты химической технологии», ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», Иваново, Россия.

УДК 661.183.2: 669.111.35
DOI: 10.17277/vestnik.2022.03.pp.476-486

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЩЕЛОЧНОЙ АКТИВАЦИИ УГЛЕРОДНОГО МАТЕРИАЛА С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВОДЯНЫМ ПАРОМ

А. А. Попова, И. Н. Шубин

Кафедра «Техника и технологии производства нанопродуктов», alyona.popova.93@list.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия

Ключевые слова: активированный углеродный материал; высокотемпературная активация; диагностика характеристик; технологические режимы.

Аннотация: Проведены экспериментальные исследования по определению эффективных технологических режимов высокотемпературной щелочной активации углеродного материала. В ходе проведения активации на реакционную смесь, состоящую из предварительно карбонизированного углеродного сырья и щелочи, осуществлялось дополнительное воздействие водяным паром. Установлены эффективные режимные значения, а именно: продолжительность процесса, температура, расход инертного газа и воды, обеспечивающие получение активированного высокопористого углеродного материала с удельной поверхностью по BET до 2700 м^2/г и объемом пор по DFT более 1,32 см^3/г, приходящихся на микро- и мезометровый диапазоны.

Введение

Углеродные материалы, обладающие большой удельной поверхностью – более 1000 м^2/г и объемом пор, превышающим 0,6…0,8 см^3/г, являются наиболее перспективными и востребованными в целом ряде высокотехнологичных отраслей промышленности: фармацевтической, энергетической, радиоэлектронной и др. Среди данных материалов особенно выделяются высокопористые материалы с большим содержанием пор, приходящихся на микро- и мезодиапазоны. Данные материалы могут применяться в качестве универсальных сорбентов для жидких и газовых сред, средств хранения и транспортировки газового сырья, катализаторов и т.д. Углеродные материалы, обладающие развитой системой микро- и мезопор, являются наиболее сбалансированными, сочетающими значительную удельную поверхность, соответствующую доступным порам и большой объем пор с достаточно крупными транспортными порами, обеспечивающими быструю диффузию молекул сорбируемых веществ [1 – 3]. Для получения активированных углеродных материалов различное углеродное сырье подвергают предварительной карбонизации, а далее активируют жидко- или газофазными реагентами, например, водяным паром, различными кислотами или щелочами и т.д. За счет чего создается необходимая большая удельная поверхность и высокопористая структура [4 – 6].

Предварительные исследования показали, что данные физико-химические и физико-структурные характеристики зависят как от исходных компонентов, применяемых для получения углеродсодержащих веществ (карбонизатов), так

и от режимов активации (массового соотношения компонентов реакционной смеси, например, при щелочной активации, гидроксида калия (КОН) к активируемому углеродному сырью, температуры и времени активации, режима газообмена в реакционной зоне и ряда др.) [7 – 9].

Высокотемпературная щелочная активация представляет собой процесс термической обработки, заключающийся в ступенчатом нагреве реакционной смеси – карбонизата с щелочью, в заданном соотношении, с выдержкой в диапазоне 400...900 °С в инертной среде. В процессе термической обработки реакционной смеси протекают многочисленные химические реакции, сопровождающиеся образованием пористой структуры активируемого материала. Причем равновесие данных процессов может быть сдвинуто в ту или другую сторону в зависимости от размеров реактора, количества вещества, температуры и концентраций (парциальных давлений, химических активностей) компонентов [4 – 6].

Исследования процесса высокотемпературной щелочной активации углеродного материала позволили определить оптимальные режимные параметры процесса (продолжительность, температуру, расход инертного газа), в результате был получен высокопористый углеродный материал, характеристики которого значительно превышали имеющиеся аналоги [10, 11].

Однако дальнейший анализ литературных источников показал большие возможности и направления исследования активации при дополнительном, многофакторном воздействии на активируемый углеродный материал, что может положительно отразиться на практической реализации данного процесса в будущем, а именно активации с помощью комбинированного воздействия на исходный карбонизат не только щелочи, но и водяного пара [12]. В данной работе показано, что различные условия обработки, и особенно природа окислителей, оказывают существенное положительное влияние на концентрацию и тип функциональных групп [13]. Следовательно, физические свойства, например, гидрофильность и сорбционные характеристики, а также химическая реакционная способность, могут быть изменены. Традиционно активация углеродного сырья проводится в газовой фазе в присутствие КОН или H_2O при высоких температурах (700…900 °С), что приводит к значительному развитию пористости. Но, например, кислородсодержащие функциональные группы, которым обычно не уделяют достаточного внимания, могут также образовываться на углеродной поверхности в дополнении к структурным изменениям, вызываемым в процессе активации, и приводить к изменению структуры материала [14 – 16]. Во время термообработки пар может действовать как мягкий окислитель, в то время, как сложные окислительно-восстановительные реакции могут происходить между КОН, углеродом и соединениями, образующимися в качестве промежуточных продуктов во время химической активации [17]. Эти окислительно-восстановительные процессы позволяют использовать КОН и водяной пар для активации углеродных поверхностей без значительного изменения структуры за счет оптимизации параметров реакции. Различные кислородсодержащие функциональные группы на углеродном сырье разлагаются с выделением CO, CO_2 и воды в потоке инертного газа в различных диапазонах характеристических температур [18, 19].

В ряде работ исследованы различные параметры совместной обработки КОН и паром, включая введение пара, различное массовое соотношение КОН и углеродного сырья, температуру и варианты пост-обработки после воздействия паром. В результате, установлено, что начало активных реакций приходится на момент, когда активируемый углеродный материал нагревается до 450 °С в присутствии КОН. Пар при этом может окислять углеродную поверхность в соответствии с реакцией

$$C + H_2O – CO + H_2. \quad (1)$$

Кроме того, CO может быть преобразован в CO_2 в соответствии с реакцией конверсии водяного газа

$$CO + H_2O – CO_2 + H_2. \quad (2)$$

Наличие KOH необходимо для протекания реакций окисления поверхности углерода посредством пара при температуре от 450 °C и выше.

Установлено, что большее количество гидроксида калия не оказывает существенного влияния на протекание реакций, в то время как меньшее было благоприятным, так как оно приводило к менее термически нестабильным группам, связанным с CO_2. Следовательно, KOH и введение водяного пара демонстрируют синергетический эффект при активации термически стабильными группами –CO–, что согласуется с другими литературными сообщениями и предварительными исследованиями о том, что соединения калия эффективно катализируют газификацию углеродных материалов паром, что значительно снижает температура реакции [20]. При этом установлено, что значительное количество CO_2 стало выделяться в диапазоне 550…610 °C, тогда как при более низких температурах выделение CO и CO_2 было незначительным, то есть разложение групп –CO– до CO_2 происходит согласно формуле (4), и выделение CO_2 во время совместной обработки, вероятно, связано с адсорбцией CO_2 KOH с образованием K_2CO_3

$$2\ KOH + CO_2 \longrightarrow K_2CO_3 + H_2O. \quad (3)$$

Выделение CO_2 резко прекращалось, когда температура опускалась ниже 550 °C. Это означало, что начальная температура эффективной активации углеродного материала во время совместной обработки близка к 550 °C. Результатом активации являлся углеродный материал с увеличенной удельной поверхностью с преобладанием мезопор. Остаточные частицы калия, обнаруженные в обработанных углеродных нанотрубках (**УНТ**) и другом углеродном сырье после отмывки, предположительно, присутствуют в виде интеркалированных частиц в слоях графена ниже внешней поверхности [12].

В результате установлена возможность проведения активации при более низких рабочих температурах, что несомненно имеет важное практическое значение, так как, в отличие от исследований в ранее рассмотренных работах, эксперименты, проведенные в рамках данной работы, носили прикладной характер и имели своей задачей определение возможности проведения относительно низкотемпературной активации, используя при этом свое сырье, режимные параметры процесса, оборудование, и направлены на получение материала с высокой удельной поверхностью и большим содержанием пор в микро и мезометровом диапазонах.

Цель работы – определение эффективных технологических режимов щелочной активации с дополнительным воздействием водяным паром на активируемый материал, обеспечивающих снижение температуры реализуемого процесса и получение активированного высокопористого углеродного материала с высокой удельной поверхностью.

Объекты и методы исследования

Исследования, проведенные в работах [7, 10, 21] позволили установить, что высокотемпературная активация протекает за две ярко выраженные стадии: первая стадия химических превращений происходит в температурном интервале от 380…400 °C и примерно до 550 °C, при этом выделяются в основном водород,

окись углерода, пары воды и пары высококипящих органических веществ; вторая стадия процесса активации, судя по экспериментальным исследованиям, с выделением водорода и образованием металлического калия происходит при 600…750 °C

$$6KOH + 2C \rightarrow 2K + 3H_2 + 2K_2CO_3.$$

При этом на верхней границе применяемого температурного интервала возможно протекание следующей реакции:

$$K_2CO_3 + 2C \rightarrow 2K + 3CO.$$

В работе установлены основные направления проведения исследований, которые разбиты на несколько этапов.

На первом этапе исследовалась возможность уменьшения температуры активации. Эксперимент включал активацию реакционной смеси, состоящую из карбонизированного декстрина с оксидом графена и гидроксида калия, и проводился в следующей последовательности: нагрев и последующая выдержка в течение одного часа при 400 °C и двух часов при температурах 600, 750 и 850 °C при непрерывной подаче инертного газа – 1,3 л/ч в объем реактора + выдержка в течении часа с подачей водяного пара (в объем реактора дозировано подавалась вода, которая далее переходила в водяной пар). Выбор данных температур и продолжительности процесса обусловлен: по нижней границе – собственными предварительными исследованиями и литературными данными, а по верхней – пределами безопасной эксплуатации лабораторного оборудования.

На втором этапе исследовалось – уменьшение не только температуры протекания процесса активации, но и его продолжительности, то есть комплексное повышение эффективности процесса в целом, что наиболее значимо с промышленной точки зрения. Цель исследования на данном этапе – определение и уточнение наиболее эффективных режимных параметров активации. Проводили три серии экспериментов:

– в первой – время активной стадии активации сокращено с двух часов до одного часа + один час активации с дополнительной подачей пара;

– во второй – продолжительность процесса стандартна, но снижена нижняя температурная граница для уточнения и проверки эффективных режимных параметров (температуры);

– в третьей – продолжительность процесса стандартна, но обработка паром составляла два часа при температуре активации T = 600 °C, одновременно с выдержкой.

Для проведения экспериментальных исследований на обоих этапах использовалась лабораторная установка (рис. 1).

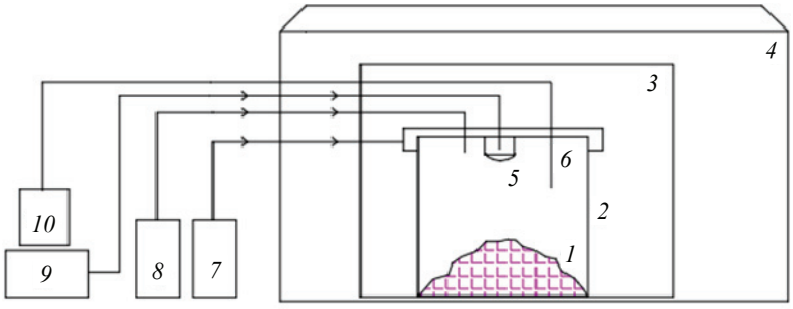


Рис. 1. Схема лабораторной установки:
1 – активируемый материал; *2* – реактор активации; *3* – муфельная печь; *4* – вытяжной шкаф; *5* – чаша для испарения воды; *6* – термопара; *7* – расходомер инертного газа для подачи в газовый шлюз; *8* – расходомер инертного газа для подачи в реактор активации; *9* – шприцевый дозатор; *10* – программатор

В муфельной печи *3* установлен реактор активации *2*, в который подается инертный газ – аргон, причем, как непосредственно в сам реактор, так и в газовый шлюз, обеспечивающий герметичность. Расход инертного газа регулируется расходомерами газа лабораторными *7* и *8*. В качестве дополнительного воздействия на активируемую реакционную смесь *1* в реактор подается с помощью шприцевого дозатора *9* вода, которая, попадая в чашу *5*, испаряется. Температура в реакторе контролируется термопарой *6*, подключенной к программатору «Овен ТРМ 101» *10*. Причем муфельная печь установлена в вытяжном шкафу *4*. Активируемый материал представляет собой реакционную смесь, которая состоит из карбонизата – предварительно термообработанного углеродного сырья и гидроксида калия в соотношении 1:3.

Диагностика характеристик активированного углеродного материала проводилась с помощью анализатора поверхности и пористости Nova Quantachrome E1200. Удельная поверхность определялась по многоточечному методу BET, удельный объем пор и их распределение по размерам – по методу DFT.

Результаты исследования и их обсуждение

На первом этапе исследований получены данные, представленные в табл. 1. Наиболее эффективным значением температуры при дополнительной обработке паром, который выполняет роль мягкого окислителя, является 600 °С. При этой температуре, согласно проведенному исследованию, наблюдается наиболее сильный синергетический эффект от температуры и воздействия пара на образование удельной поверхности и пористость. Соответственно, эффект от применения дополнительной обработки значительно увеличивался (снижение температуры активации – важный промышленный плюс, так как ее понижение с 750 до 600 °С – это переход к более простым технологическим процессам и оборудованию).

Также, из полученных результатов видно, что при увеличении температуры наблюдается уменьшение удельного объема пор со смещением их распределения из микро- в мезодиапазон, что можно объяснить интенсификацией суммарного воздействия высокой температуры, соединений калия и присутствия пара с последующим разрушением структуры углеродного материала, то есть разрушением микропористой структуры с образованием мезопористой.

Полученные результаты хорошо согласуются с химическими процессами, протекающими при активации, а также рассмотренными в работах [3, 12, 22], и указывают на смещение равновесия при изменении условий по сравнению со «стандартным» процессом активации [10]. Вследствие чего, можно предположить, что в качестве особенностей данного варианта активации будет наличие дополнительно протекающей окислительно-восстановительной реакции Будуара на поверхности активируемого углеродного материала. При этом лимитирующими будут являться реакции, которые чувствительны к исходным компонентам

Таблица 1

Исследование влияния обработки водяным паром на параметры активированного материала

Нагрев, °С	S_{BET}, м^2/г	S_{DFT}, м^2/г	$V_{\Sigma DFT}$, см^3/г	$V_{микропор}$, см^3/г	Размер пор max/средний
600	2691	1845	1,329	0,82	5,16/2,08
750	1831	1481	0,892	0,63	5,29/1,88
850	2098	1416	1,278	0,51	5,68/3,2

Таблица 2

Результаты экспериментов по уточнению режимных параметров процесса высокотемпературной активации

Серия	S_{BET}, м^2/г	S_{DFT}, м^2/г	$V_{\Sigma DFT}$, см^3/г	$V_{микропор}$, см^3/г	$V_{мезопор}$, см^3/г
Первая	1709	1588	0,758	0,755	0,003
Вторая	591	668	0,285	0	0,285
Третья	1297	1538	0,627	0	0,627

изменению температуры и характеризуются протеканием в условиях избыточного содержания водяного пара в присутствии металла, являющегося катализатором, в данном случае калия:

$$\begin{cases} C + H_2O \rightarrow CO + H_2; \\ CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2; \\ 2\,KOH + CO_2 \rightarrow K_2CO_3 + H_2O. \end{cases}$$

Результаты по второму этапу исследований, представлены в табл. 2. Их анализ позволяет сделать следующие выводы: *в первой серии* для получения высоких характеристик активированного материала не хватило времени активации; *во второй* – «процесс не пошел», так как не были созданы необходимые условия для протекания процесса активации; *в третьей* – получен мезопористый материал с невысокими характеристиками, что может свидетельствовать о неотработанности данного варианта реализации процесса.

Тем не менее полученные на этом этапе результаты исследований нельзя считать окончательными или отрицательными, так как данное направление совершенствования процесса активации является весьма перспективным, но требующим проведения дополнительных исследование и настройки режимных параметров, то есть необходимости проведение дополнительных исследований по определению продолжительности процесса – причем, как выдержки, так и подачи пара, а также уточнения температуры, подбора исходного углеродного сырья и ряда др.

Выводы

Проведенные исследования доказали возможность снижения температуры протекания высокотемпературной щелочной активации с 750 до 600 °С при подаче воды в реактор в объеме 17,5 мл^3 в течении часа, что является главной составляющей при масштабировании данного процесса от лабораторных исследований до промышленного производства, являясь важным промышленным плюсом, в том числе реальным шагом для перехода к более простой реализации данного процесса. Это достигается за счет синергетического эффекта от суммарного воздействия КОН и водяного пара на активируемый углеродный материал, обеспечивая образование высокопористой удельной поверхности с большим объемом микро- и мезопор, при этом получен высокопористый углеродный материал с удельной поверхностью около 2700 м^2/г по BET и объемом микро- и мезопор по DFT более 1,32 см^3/г. Следовательно, все поставленные цели в рамках данного исследования успешно достигнуты.

Список литературы

1. Мищенко, С. В. Углеродные наноматериалы. Производство, свойство, применение / С. В. Мищенко, А. Г. Ткачев. – М. : Машиностроение, 2008. – 320 с.

2. Фенелонов, В. Б. Пористый углерод / В. Б. Фенелонов. – Новосибирск : Институт катализа СО РАН, 1995. – 518 с.

3. Адсорбционные системы аккумулирования метана на основе углеродных пористых структур / А. Ю. Цивадзе, О. Е. Аксютин, А. Г. Ишков [и др.] // Успехи химии. – 2018. – Т. 87, № 10. – С. 950 – 983.

4. Popova, A. A. Apparatus and Technological Design of the Production Process of Activated Highly Porous Carbon Material / A. A. Popova, I. N. Shubin // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1942. – P. 012025. doi: 10.1088/1742-6596/1942/1/012025

5. Попова, А. А. Синтез и исследование нанопористого углеродного материала / А. А. Попова, Р. Э. Алиев, И. Н. Шубин // Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы : материалы X Всероссийской науч.-практ. конф., 16–17 октября 2020 г., Рубцовск. – Рубцовск, 2020. – С. 136 – 141.

6. Influence of the Activating Agent and the Inert Gas (Type and Flow) Used in an Activation Process for the Porosity Development of Carbon Nanofibers / V. Jiménez, P. Sánchez, J. L. Valverde, A. Romero // Journal of Colloid and Interface Science. – 2009. – Vol. 336. – P. 712 – 722. doi: 10.1016/j.jcis.2009.04.017

7. Carbon Activation with KOH as Explored by Temperature Programmed Techniques, and the Effects of Hydrogen / D. Lozano-Castello, J. M. Calo, D. Cazorla-Amoros, A. Linares-Solano // Carbon. – 2007. – Vol. 45. – P. 2529 – 2536. doi: 10.1016/j.carbon.2007.08.021

8. Пат. № 2620404 Российская Федерация, МПК C01B 31/08. Способ получения мезопористого углерода / А. Г. Ткачев, А. В. Мележик, Г. В. Соломахо ; заявитель и патентообладатель ООО «НаноТехЦентр». – № 2016102551; заявл. 26.01.2016 ; опубл. 25.05.2017, Бюл. № 15. – 19 с.

9. Пат № 2736586 Российская Федерация, МПК B01J 20/20, B01J 20/30. Формованный наноструктурированный микропористый углеродный сорбент и способ его получения / А. Г. Ткачев, Н. Р. Меметов, А. Е. Кучерова, А. В. Мележик, И. Н. Шубин, А. Д. Зеленин, А. А. Попова ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет». – № 2019121997 ; заявл. 09.07.2019 ; опубл. 18.11.2020, Бюл. № 32. – 7 с.

10. Попова, А. А. Особенности технологии получения нанопористого углеродного материала / А. А. Попова, М. К. Гусейнов, И. Н. Шубин // Вестн. Дагестанского гос. ун-та. Серия 1: Естественные науки. – 2021. – Т. 36, № 4. – С. 7 – 12. doi: 10.21779/2542-0321-2021-36-4-7-12

11. Попова, А. А. Аппаратурно-технологическое оформление производства активированного углеродного материала / А. А. Попова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2021. – Т. 27, № 2. – С. 318 – 327. doi: 10.17277/vestnik.2021.02.pp.318-327

12. Synergistic Effect of Potassium Hydroxide and Steam Co-Treatment on the Functionalization of Carbon Nanotubes Applied as Basic Support in the Pd-Catalyzed Liquid-Phase Oxidation of Ethanol / W. Dong, W. Xia, K. Xie [et al.] // Carbon. – 2017. – Vol. 121. – P. 452 – 462. doi: 10.1016/J.CARBON.2017.06.019

13. Surface and Structural Characterization of Multi-Walled Carbon Nanotubes Following Different Oxidative Treatments // K. A. Wepasnick, B. A. Smith, K. E. Schrote [et al.] // Carbon. – 2011. – Vol. 49 (1). – P. 24 – 36. doi: 10.1016/J.CARBON.2010.08.034

14. KOH-Activated Multi-Walled Carbon Nanotubes as Platinum Supports for Oxygen Reduction Reaction / C. He, S. Song, J. Liu [et al.] // Journal of Power Source. – 2010. – Vol. 195, No. 21. – P. 7409 – 7414. doi: 10.1016/j.jpowsour.2010.05.050

15. Porous Carbon Nanotubes Etched by Water Steam for High-Rate Large-Capacity Lithiumesulfur Batteries / Z. Xiao, Z. Yang, H. Nie [et al.] // Journal of Materials Chemistry A. – 2014. – No. 23. – P. 8683 – 8689. doi: 10.1016/j.jpowsour.2010.05.050

16. The Superior Electrochemical Performance of Oxygen-Rich Activated Carbons Prepared from Bituminous Coal / C. Zhang, D. Long, B. Xing [et al.] // Electrochemistry Communications. – 2008. – Vol. 10, No. 11. – P. 1809 – 1811. doi: 10.1016/j.elecom.2008.09.019

17. Wang, J. KOH Activation of Carbon-Based Materials for Energy Storage / J. Wang, S. Kaskel // Journal of Materials Chemistry. – 2012. – No. 45. – P. 23710 – 23725. doi: 10.1039/C2JM34066F

18. Quantitative Studies on the Oxygen and Nitrogen Functionalization of Carbon Nanotubes Performed in the Gas Phase / C. Li, A. Zhao, W. Xia [et al.] // The Journal of Physical Chemistry C. – 2012. – Vol. 116, No. 39. – P. 20930 – 20936. doi: 10.1021/jp306866q19

19. Chen, P. The Influence of the Residual Growth Catalyst in Functionalized Carbon Nanotubes on Supported Pt Nanoparticles Applied in Selective Olefin Hydrogenation / P. Chen, L. M. Chew, W. Xia // Journal of Catalysis. – 2013. – Vol. 307. – P. 84 – 93. doi: 10.1016/j.jcat.2013.06.030

20. Nzihou, A. A Review of Catalysts for the Gasification of Biomass Char, with Some Reference to Coal / A. Nzihou, B. Stanmore, P. Sharrock // Energy. – 2013. – Vol. 58. – P. 305 – 317. doi: 10.1016/J.ENERGY.2013.05.057

21. Popova, A. A. Features of Nanoporous Carbon Material Synthesis / A. A. Popova, R. E. Aliev, I. N. Shubin // Advanced Materials & Technologies. – 2020. – No. 3 (19). – P. 28 – 32. doi: 10.17277/amt.2020.03.pp.028-032

22. Попова, А. А. Исследование влияния технологических параметров на аппаратурное оформление процесса производства активированного углеродного материала / А. А. Попова, И. Н. Шубин // Известия высш. учеб. заведений. Машиностроение. – 2022. – № 1 (742). – С. 20 – 30. doi: 10.18698/0536-1044-2022-1-20-30

Investigation of the Process of High-Temperature Alkaline Activation of Carbon Material with Additional Action of Water Vapor

A. A. Popova, I. N. Shubin

Department of Equipment and Technology for Nanoproduction, alyona.popova.93@list.ru; TSTU, Tambov, Russia

Keywords: activated carbon material; high temperature activation; characteristics diagnostics; technological modes.

Abstract: Experimental studies have been carried out to determine the effective technological modes of high-temperature alkaline activation of carbon material. During the activation, the reaction mixture, consisting of pre-carbonized carbon raw materials and alkali, was additionally exposed to water vapor. Efficient regime values, namely

the duration of the process, the temperature, the consumption of inert gas and water, which ensure the production of an activated highly porous carbon material with a BET specific surface area of up to 2700 m^2/g and a DFT pore volume exceeding 1.32 cm^3/g per micro- and mesometric range, have been established.

References

1. Mishchenko S.V., Tkachev A.G. *Uglerodnyye nanomaterialy. Proizvodstvo, svoystvo, primeneniye* [Carbon nanomaterials. Production, property, application], Moscow: Mashinostroyeniye, 2008, 320 p. (In Russ.)

2. Fenelonov V.B. *Poristyy uglerod* [Porous carbon], Novosibirsk: Institut kataliza SO RAN, 1995, 518 p. (In Russ.)

3. Tsivadze A.Yu., Aksyutin O.Ye., Ishkov A.G. [et al.] [Adsorption systems for methane accumulation based on carbon porous structures], *Uspekhi khimii* [Advances in chemistry], 2018, vol. 87, no. 10, pp. 950-983. (In Russ.)

4. Popova A.A., Shubin I.N. Apparatus and Technological Design of the Production Processof Activated Highly Porous Carbon Material, *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1942, p. 012025, doi: 10.1088/1742-6596/1942/1/012025

5. Popova A.A., Aliyev R.E., Shubin I.N. *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii: problemy, sostoyaniye i perspektivy* [Modern equipment and technologies: problems, state and prospects], Proceedings of the X All-Russian Scientific Practical Conference, 16-17 October, 2020, Rubtsovsk, 2020, pp. 136-141. (In Russ.)

6. Jiménez V., Sánchez P., Valverde J.L., Romero A. Influence of the Activating Agent and the Inert Gas (Type and Flow) Used in an Activation Process for the Porosity Development of Carbon Nanofibers, *Journal of Colloid and Interface Science*, 2009, vol. 336, pp. 712-722, doi: 10.1016/j.jcis.2009.04.017

7. Lozano-Castello D., Calo J.M., Cazorla-Amoros D., Linares-Solano A. Carbon Activation with KOH as Explored by Temperature Programmed Techniques, and the Effects of Hydrogen, *Carbon*, 2007, vol. 45, pp. 2529-2536, doi: 10.1016/j.carbon.2007.08.021

8. Tkachev A.G., Melezhik A.V., Solomakho G.V. *Sposob polucheniya mezoporistogo ugleroda* [Method for producing mesoporous carbon], Russian Federation, 2017, Pat. 2620404. (In Russ.)

9. Tkachev A.G., Memetov N.R., Kucherova A.Ye., Melezhik A.V., Shubin I.N., Zelenin A.D., Popova A.A. *Formovannyy nanostrukturirovannyy mikroporistyy uglerodnyy sorbent i sposob yego polucheniya* [Molded nanostructured microporous carbon sorbent and method of its production], Russian Federation, 2020, Pat 2736586. (In Russ.)

10. Popova A.A., Guseynov M.K., Shubin I.N. [Features of the technology for obtaining nanoporous carbon material], *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 1: Yestestvennyye nauki* [Bulletin of the Dagestan State University. Series 1: Natural Sciences], 2021, vol. 36, no. 4, pp. 7-12, doi: 10.21779/2542-0321-2021-36-4-7-12 (In Russ., abstract in Eng.)

11. Popova A.A. [Hardware and technological design of the production of activated carbon material], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2021, vol. 27, no. 2, pp. 318-327, doi: 10.17277/vestnik.2021.02.pp.318-327 (In Russ., abstract in Eng.)

12. Dong W., Xia W., Xie K., Peng B., Muhler M. Synergistic Effect of Potassium Hydroxide and Steam Co-Treatment on the Functionalization of Carbon Nanotubes

Applied as Basic Support in the Pd-Catalyzed Liquid-Phase Oxidation of Ethanol, *Carbon*, 2017, vol. 121, pp. 452-462, doi: 10.1016/J.CARBON.2017.06.019

13. Wepasnick K.A., Smith B.A., Schrote K.E., Wilson H.K., Diegelmann S.R., Fairbrother D.H. Surface and Structural Characterization of Multi-Walled Carbon Nanotubes Following Different Oxidative Treatments, *Carbon*, 2011, vol. 49 (1), pp. 24-36, doi: 10.1016/J.CARBON.2010.08.034

14. He C., Song S., Liu J., Maragou V., Tsiakaras P. KOH-Activated Multi-Walled Carbon Nanotubes as Platinum Supports for Oxygen Reduction Reaction, *Journal of Power Source*, 2010, vol. 195, no. 21, pp. 7409-7414, doi: 10.1016/j.jpowsour. 2010.05.050

15. Xiao Z., Yang Z., Nie H., Lu Y., Yang K., Huang S. Porous Carbon Nanotubes Etched by Water Steam for High-Rate Large-Capacity Lithiumesulfur Batteries, *Journal of Materials Chemistry A*, 2014, no. 23, pp. 8683-8689, doi: 10.1016/j.jpowsour. 2010.05.050

16. Zhang C., Long D., Xing B. [et al.] The Superior Electrochemical Performance of Oxygen-Rich Activated Carbons Prepared from Bituminous Coal, *Electrochemistry Communications*, 2008, vol. 10, no. 11, pp. 1809-1811, doi: 10.1016/j.elecom. 2008.09.019

17. Wang J., Kaskel S. KOH Activation of Carbon-Based Materials for Energy Storage, *Journal of Materials Chemistry*, 2012, no. 45, pp. 23710-23725, doi: 10.1039/C2JM34066F

18. Li C., Zhao A., Xia W., Liang C., Muhler M. Quantitative Studies on the Oxygen and Nitrogen Functionalization of Carbon Nanotubes Performed in the Gas Phase, *The Journal of Physical Chemistry C*, 2012, vol. 116, no. 39, pp. 20930-20936, doi: 10.1021/jp306866q19

19. Chen P., Chew L.M., Xia W. The Influence of the Residual Growth Catalyst in Functionalized Carbon Nanotubes on Supported Pt Nanoparticles Applied in Selective Olefin Hydrogenation, *Journal of Catalysis*, 2013, vol. 307, pp. 84-93, doi: 10.1016/j.jcat.2013.06.030

20. Nzihou A., Stanmore B., Sharrock P. A Review of Catalysts for the Gasification of Biomass Char, with Some Reference to Coal, *Energy*, 2013, vol. 58, pp. 305-317, doi: 10.1016/J.ENERGY.2013.05.057

21. Popova A.A., Aliev R.E., Shubin I.N. Features of Nanoporous Carbon Material Synthesis, *Advanced Materials & Technologies*, 2020, no. 3 (19), pp. 28-32, doi: 10.17277/amt.2020.03.pp.028-032

22. Popova A.A., Shubin I.N. [Study of the influence of technological parameters on the instrumentation of the process of production of activated carbon material], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [News of higher educational institutions. Engineering], 2022, no. 1 (742), pp. 20-30, doi: 10.18698/0536-1044-2022-1-20-30 (In Russ., abstract in Eng.)

Untersuchung des Prozesses der alkalischen Hochtemperaturaktivierung von Kohlenstoffmaterial mit zusätzlicher Wirkung des Wasserdampfs

Zusammenfassung: Es sind experimentelle Studien durchgeführt, um die effektiven technologischen Modi der alkalischen Hochtemperaturaktivierung von Kohlenstoffmaterial zu bestimmen. Während der Aktivierung wurde das Reaktionsgemisch, bestehend aus vorkarbonisierten Kohlenstoffrohstoffen und Alkali,

zusätzlich dem Wasserdampf ausgesetzt. Es sind effiziente Regimewerte festgelegt, nämlich: die Dauer des Prozesses, die Temperatur, der Verbrauch an Inertgas und Wasser, die die Herstellung eines aktivierten hochporösen Kohlenstoffmaterials mit einer spezifischen Oberfläche nach BET bis zu 2700 $м^2/g$ und ein DFT-Porenvolumen von mehr als 1,32 cm^3/g pro mikro- und mesometrischem Bereich gewährleisten.

Étude du processus de l'activation alcaline à haute température du matériau carboné avec un impact supplémentaire de vapeur d'eau

Résumé: Sont réalisées les études expérimentales pour déterminer les modes technologiques efficaces d'activation alcaline à haute température du matériau carboné. Au cours de l'activation, est effectué un effet supplémentaire de vapeur d'eau sur un mélange réactionnel constitué d'une matière première carbonisée et d'un alcali. Sont établies les valeurs de fonctionnement efficacies: la durée du processus, la température, le débit de gaz inerte et d'eau, qui permettent d'obtenir un matériau de carbone hautement poreux active.

Авторы: ***Попова Алена Алексеевна*** – аспирант кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов»; ***Шубин Игорь Николаевич*** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

УДК 621.867.4-492.2
DOI: 10.17277/vestnik.2022.03.pp.487-495

К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО УПЛОТНЕНИЯ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. В. Оборин[1], А. А. Мурашов[2]

Кафедра «Компьютерно-интегрированная технология машиностроения», oborinav@ystu.ru; ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет» (1);
кафедра «Математика», ФГКВОУ ВО «Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны» (2), Ярославль, Россия

Ключевые слова: газодинамические эффекты; математическая модель; оборудование для пневматического уплотнения; пневматическое уплотнение (деаэрация); расчет; тонкодисперсный материал.

Аннотация: Рассмотрен процесс пневматического уплотнения порошков. Предложена математическая модель процесса пневматического уплотнения порошков, включающая уравнение в частных производных второго порядка с учетом изменения высоты слоя порошка с заданием на верхней подвижной границе раздела твердой и газообразной фаз условия равенства нулю перепада давления. Система уравнений решена численным методом. Исследование модели показало, что учет изменения высоты слоя порошка может иметь существенное значение для повышения эффективности использования оборудования для пневматического уплотнения порошков.

В промышленности и сельском хозяйстве возрастает потребность в повышении эффективности процессов транспортирования, затаривания, хранения тонкодисперсных сыпучих материалов (каолина, технического углерода, белой сажи и др.). Для этого используются различные методы снижения их насыпной плотности. Одним из наиболее эффективных является метод пневмоуплотнения, основанный на использовании газодинамических эффектов, поскольку при небольшом перепаде давления может быть существенно уменьшен объем порошка [1]. Для повышения эффективности его реализации возможно использование различного оборудования с сужающимися каналами (поршневого, шнекового, с вращающимися лопатками и др.) [2]. Необходимым условием его успешного расчета и конструирования является развитие математического моделирования таких процессов [3].

Для расчета параметров пневмоуплотнителей, в частности с изменяющимся объемом камер для порошка, важно знать, как будет меняться высота слоя порошка в процессе его пневмоуплотнения и какое влияние данное изменение будет оказывать на процесс.

В работе [4] рассматривался способ пневмоуплотнения в сосуде с воздухонепроницаемым дном и вакуумной установкой. При этом сначала из сосуда откачивался воздух для создания в порошке и вокруг него пониженного давления, а затем в сосуд подавался воздух, и за счет атмосферного давления происходила упаковка частиц порошка. Данный процесс представлен математической моделью вида:

$$\frac{\partial^2(\Delta P_г)}{\partial z^2}(P_а - \Delta P_г) - \left(\frac{\partial(\Delta P_г)}{\partial z}\right)^2 = \frac{k}{\mu_г}\frac{\partial(\Delta P_г)}{\partial t}, \quad (1)$$

$$z = 0, \quad \frac{\partial(\Delta P_г)}{\partial z} = 0;$$

$$z = h, \quad \Delta P_г = 0;$$

$$t = 0, \quad \Delta P_г = \Delta P,$$

в которой распределение перепада давления в слое порошка $\Delta P_г$ с течением времени рассматривалось без учета изменения высоты слоя порошка *h(t)* в цилиндре (рис. 1); $P_а$ – атмосферное давление; h – начальная высота слоя порошка; ΔP – перепад давления в слое порошка и вне его.

Объем, занимаемый порошком до процесса уплотнения, будет определяться выражением

$$V_{с0} = \frac{\pi d_ц^2}{4} h, \quad (2)$$

где $d_ц$ – внутренний диаметр цилиндра.

По мере пневмоуплотнения объем порошка в цилиндре будет уменьшаться, его текущее значение равно

$$V_с = \frac{\pi d_ц^2}{4} h(t), \quad (3)$$

где *h(t)* – текущая высота слоя порошка.

Тогда с учетом выражений (2) и (3) текущая высота слоя порошка будет равна

$$h(t) = \frac{V_с}{V_{с0}} h, \quad (4)$$

Выразим текущую высоту слоя порошка через пористость. Согласно [2], текущая и начальная порозность порошка определяются выражениями:

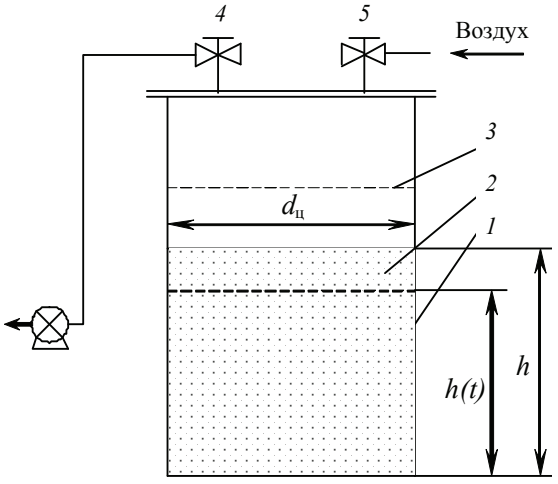


Рис. 1. Принципиальная схема пневматической деаэрации порошков:
1 – сосуд; *2* – порошок; *3* – фильтр; *4*, *5* – клапаны

$$\alpha_2 = \frac{\rho_c}{\rho_т}; \quad \alpha_{20} = \frac{\rho_{c0}}{\rho_т}, \tag{5}$$

где ρ_c, ρ_{c0}, $\rho_т$ – плотности соответственно порошка, насыпная и твердой фазы.

Учитывая известное соотношение между плотностью, массой, объемом вещества и пренебрегая массой газообразной фазы порошка, получим:

$$\alpha_2 = \frac{V_т}{V_{c0}}; \quad \alpha_{20} = \frac{V_т}{V_c}. \tag{6}$$

Порозность в свою очередь связана с пористостью соотношениями [2]:

$$\alpha_2 = 1 - \alpha_1; \quad \alpha_{20} = 1 - \alpha_{10}. \tag{7}$$

С учетом выражений (6) и (7) текущая высота слоя порошка равна

$$h(t) = \frac{1 - \alpha_{10}}{1 - \alpha_1} h. \tag{8}$$

Пористость α_1 можно рассматривать как среднюю величину по высоте слоя порошка в момент времени t

$$\alpha_1 = \overline{\alpha}_1(t) = \frac{1}{h(t)} \int_0^{h(t)} \alpha_1(z, t) dz, \tag{9}$$

где пористость $\alpha_1(z, t)$ определяется выражением [3]

$$\alpha_1(z, t) = 1 - (1 - \alpha_{10}) \mathrm{e}^{\frac{\Delta P - \Delta P_г}{A}}, \tag{10}$$

где $A = (\lambda + 2\mu)/3$, λ и μ – коэффициенты Ламэ зернистого скелета.

После подстановки выражения (10) в (9) и преобразования получим уравнение

$$\int_0^{h(t)} \mathrm{e}^{\frac{\Delta P - \Delta P_г}{A}} dz - h = 0. \tag{11}$$

Тогда, с учетом вышеизложенного, граничные и начальные условия для уравнения (1) запишутся в виде:

$$z = 0, \quad \frac{\partial(\Delta P_г)}{\partial z} = 0; \tag{12}$$

$$z = h(t), \quad \int_0^{h(t)} \mathrm{e}^{\frac{\Delta P - \Delta P_г}{A}} dz - h = 0, \ \Delta P_г = 0; \tag{13}$$

$$t = 0, \quad \Delta P_г = \Delta P. \tag{14}$$

Уравнение (1) с граничными условиями (12), (13) и начальным условием (14) решалось численно, с помощью метода конечных элементов в вариационной постановке.

В результате подобран функционал χ вида

$$\chi = \int_V \frac{\Delta P_г^2}{2} \frac{\partial^2(\Delta P_г)}{\partial z^2} + \left(\frac{P_а}{2} + \Delta P_г\right)\left(\frac{\partial(\Delta P_г)}{\partial z}\right)^2 - \frac{k}{\mu_г} \frac{\partial(\Delta P_г)}{\partial t} \Delta P_г dV, \tag{15}$$

который с помощью условий:

$$\frac{\partial F}{\partial \Delta P_{\text{г}}} - \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial F}{\partial \frac{\partial(\Delta P_{\text{г}})}{\partial z}}\right) = 0;$$
$$\frac{\partial F}{\partial \frac{\partial(\Delta P_{\text{г}})}{\partial z}} = 0, \tag{16}$$

где F – подинтегральная функция из выражения (15), позволяет записать уравнение (1) с граничным условием (12). Далее проведена разбивка одномерной области определения функции $\Delta P_{\text{г}}$ на конечные симплекс-элементы длиной h_z и аппроксимация неизвестной функции полиномом первой степени

$$\Delta P_{\text{г}j} = \frac{z - z_{i,\,k}}{z_{i+1,\,k} - z_{i,\,k}} \Delta P_{\text{г}i,\,k} + \frac{z_{i+1,\,k} - z}{z_{i+1,\,k} - z_{i,\,k}} \Delta P_{\text{г}i+1,\,k}\,. \tag{17}$$

По переменной t выбираем шаг h_t. Область решения представлена на рис. 2.

Произвольной точке решения (i, k) соответствуют координаты:

$$z_i = h_z i\,, \quad i = 0, l-1\,; \tag{18}$$

$$t_k = h_t k\,, \quad k = 0, m\,, \tag{19}$$

где параметры l и m определяются выражениями:

$$l = \frac{h}{h_z}; \quad m = \frac{T}{h_t},$$

где T – период времени, в который происходит процесс.

Для аппроксимации производной по времени в выражении (15) используем конечную разность

$$\frac{\partial(\Delta P_{\text{г}})}{\partial t} \approx \frac{\Delta P_{\text{г}\,i,\,k+1} - \Delta P_{\text{г}\,i,\,k}}{h_t}\,. \tag{20}$$

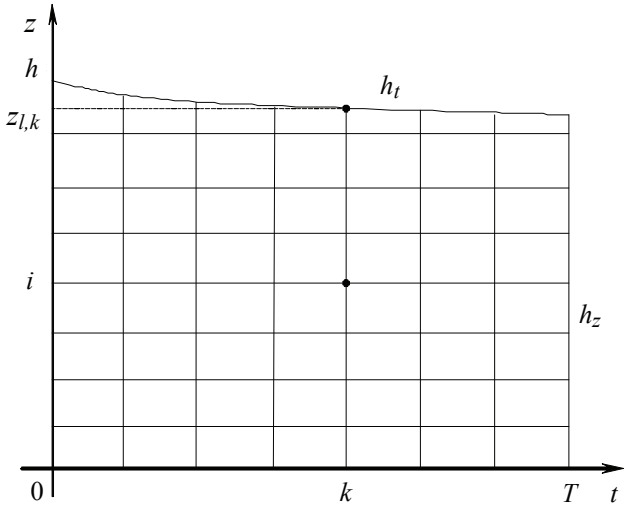


Рис. 2. Область решения задачи

После подстановки выражений (17), (18) в функционал (15) получаем его приближенное значение

$$\tilde{\chi} = \sum_{j=1}^{n} \int_V \frac{\Delta P_{\text{г}j}^{\,2}}{2} \frac{\partial^2 \left(\Delta P_{\text{г}j}\right)}{\partial z^2} + \left(\frac{P_{\text{а}}}{2} + \Delta P_{\text{г}j}\right) \left(\frac{\partial \left(\Delta P_{\text{г}j}\right)}{\partial z}\right)^2 - \frac{k}{\mu_{\text{г}}} \frac{\Delta P_{\text{г}\,i,\,k+1} - \Delta P_{\text{г}\,i,\,k}}{h_t} \Delta P_{\text{г}j} dV, \quad (21)$$

где n – количество конечных элементов.

Таким образом, для нахождения численного решения задачи (1), (12) – (14) необходимо минимизировать функционал (21). Для этого берем от него частные производные по неизвестным $\Delta P_{\text{г}i,\,k}$ и приравниваем их к нулю

$$\frac{\partial \tilde{\chi}}{\partial \left(\Delta P_{\text{г}\,i,\,k}\right)} = 0 . \quad (22)$$

В результате получаем систему уравнений:

$$\begin{gathered} P_{\text{а}} \left(\frac{\Delta P_{\text{г}\,i,\,k+1} - \Delta P_{\text{г}\,i-1,\,k+1}}{z_{\,i,\,k+1} - z_{\,i-1,\,k+1}} + \frac{\Delta P_{\text{г}\,i,\,k+1} - \Delta P_{\text{г}\,i-1,\,k+1}}{z_{\,i+1,\,k+1} - z_{\,i,\,k+1}} \right) + \\ + \frac{\mu_{\text{г}}}{2kh_t} \left[\left(2\Delta P_{\text{г}\,i,\,k+1} - \Delta P_{\text{г}\,i,\,k} - \Delta P_{\text{г}\,i,\,k+2}\right) \left(z_{\,i+1,\,k+1} - z_{\,i,\,k+1}\right) + \right. \\ + \left(\Delta P_{\text{г}\,i+1,\,k+1} - \Delta P_{\text{г}\,i+1,\,k+2}\right) \left(z_{\,i+1,\,k+2} - 3z_{\,i,\,k+1}\right) + \\ \left. + \left(\Delta P_{\text{г}\,i,\,k+1} - \Delta P_{\text{г}\,i,\,k}\right) \left(z_{\,i,\,k+1} - 3z_{\,i-1,\,k+1}\right) \right] = 0; \\ i = 1,\, l-1; \quad k = 1,\, m-1. \end{gathered} \quad (23)$$

Кроме того, учитываем:

$$\begin{aligned} &\Delta P_{\text{г}\,i\text{-}1,\,1} = \Delta P , \qquad i = 1,\, l+1 ; \\ &\Delta P_{\text{г}\,0,\,k} = \Delta P_{\text{г}\,1,\,k} , \qquad i = 1,\, m ; \\ &\Delta P_{\text{г}\,l,\,k+1} = 0 , \quad k = 1,\, m-1 ; \\ &\Delta P_{\text{г}\,i,\,k} = 0 , \; k > l \;\text{ или }\; k > m . \end{aligned} \quad (24)$$

Для определения координаты верхней границы слоя порошка используем систему уравнений

$$\begin{gathered} z_{l,\,k+1} = z_{l-1,\,k+1} + \frac{\Delta P_{\text{г}\,l\text{-}1,\,k+1}}{\mathrm{e}^{\frac{\Delta P}{A}} - \mathrm{e}^{\frac{\Delta P - \Delta P_{\text{г}\,l\text{-}1,\,k+1}}{A}}} \times \\ \times \left[\frac{h}{A} + \sum_{i=1}^{l-2} \frac{\mathrm{e}^{\frac{\Delta P - \Delta P_{\text{г}\,i+1,\,k+1}}{A}} - \mathrm{e}^{\frac{\Delta P - \Delta P_{\text{г}\,i,\,k+1}}{A}}}{\Delta P_{\text{г}\,i+1,\,k+1} - \Delta P_{\text{г}\,i,\,k+1}} \left(z_{i+1,\,k+1} - z_{i,\,k+1}\right) \right], \\ k = 1,\, m-1. \end{gathered} \quad (25)$$

Уравнения (23) с условиями (24), (25) решались при следующих условиях: $T = 15$ с; $h = 0{,}32$ м; $\Delta P = 8 \cdot 10^3$ Па; $k = 0{,}54 \cdot 10^{-11}$ м^2; $\mu_{\text{г}} = 0{,}182 \cdot 10^{-4}$Па·с; $P_{\text{а}} = 10^5$ Па; $h_t = 0{,}75$ с; $h_z = 0{,}025$ м; $\lambda = 38{,}7 \cdot 10^3$ Па; $\mu = 38{,}1 \cdot 10^3$ Па; $\alpha_{10} = 0{,}31$.

На рисунках 3 и 4, *а*, приведены соответственно зависимость высоты слоя порошка от времени и расчеты значения $\Delta P_{\text{г}}$ при разных значениях времени, с учетом и без учета изменения высоты слоя порошка, выполненные в среде Microsoft Excel.

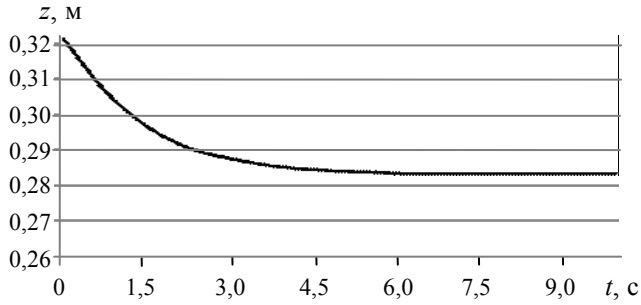
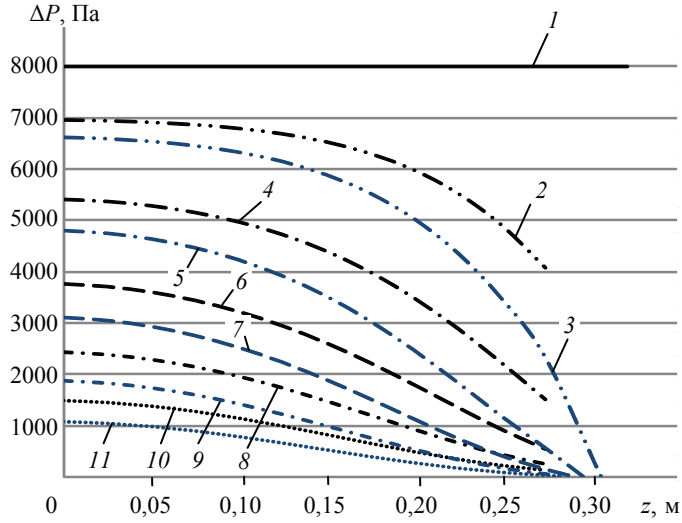
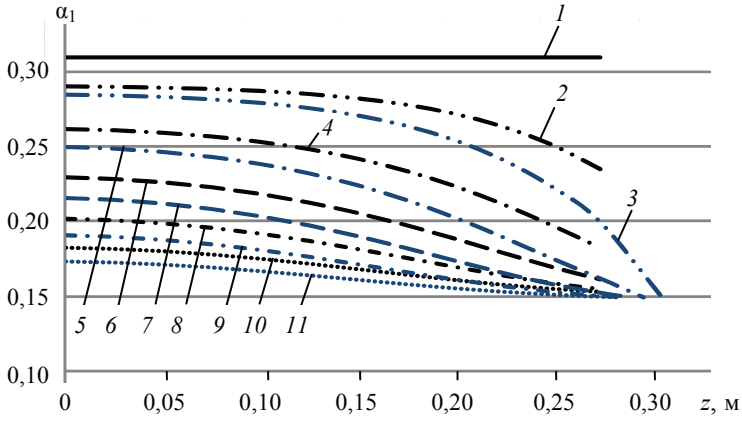


Рис. 3. Зависимость высоты слоя порошка от времени



а)



б)

Рис. 4. Зависимости перепада давлений газа (*а*) и пористости порошка (*б*) от высоты слоя порошка:

без учета изменения высоты слоя порошка: *1* – t_1 = 0 с; *2* – t_2 = 0,75 с; *3* – t_3 = 1,5 с; *4* – t_4 = 2,25 с; *5* – t_5 = 3 с; *6* – t_6 = 3,75 с; с учетом изменения высоты слоя порошка: *7* – t_7 = 0,75 с; *8* – t_8 = 1,5 с; *9* – t_9 = 2,25 с; *10* – t_{10} = 3 с; *11* – t_{11} = 3,75 с

Для определения пористости α_1 использовались соотношения:

$$\alpha_{1_{i,\,j+1}} = \alpha_{1_{i,\,j}} + \frac{1-\alpha_{1_{i,\,j}}}{A}\left(\Delta P_{\text{г}\,i,\,j+1} - \Delta P_{\text{г}\,i,\,j}\right);$$

$$\alpha_{1_{i,\,0}} = \alpha_{10}\,.$$

Задача решалась при следующих условиях: $T = 15$ с; $h = 0{,}32$ м; $\lambda = 38{,}7\cdot10^3$ Па; $\mu = 38{,}1\cdot10^3$ Па; $h_t = 0{,}75$ с; $h_z = 0{,}025$ м; $\alpha_{10} = 0{,}31$.

На рисунке 4, *б*, приведены графики зависимости значения α_1 от высоты слоя порошка при различных значениях времени с учетом и без учета изменения высоты слоя порошка, выполненные в среде Microsoft Excel.

Анализ полученных теоретических результатов показывает, что разница между пористостью с учетом и без учета изменения высоты слоя порошка в процессе пневмоуплотнения может достигать 10 % и более (в зависимости от вида и характеристик порошка), сначала увеличиваясь, затем уменьшаясь. Это может учитываться при определении характеристик оборудования для пневмоуплотнения и транспортировки порошка с изменяющимся объемом камер и выборе режимов его работы.

После уплотнения характеристики порошков в обоих случаях имеют примерно одинаковое расхождение с данными экспериментальных исследований по пневматическому уплотнению порошков, приведенными в работах [4, 5].

Список литературы

1. Densification of Powders by Means of Air, Vibratory and Mechanical Compactions / T. Akiyama, Y. Miyamoto, N. Yamanaka, J. Q. Zhang // Powder Technol. – 1986. – Vol. 46, No. 2-3. – P. 173 – 180. doi: 10.1016/0032-5910(86)80024-9

2. Капранова, А. Б. Инженерный расчет уплотнителей порошков с сужающимися каналами : монография / А. Б. Капранова, А. А. Мурашов, А. И. Зайцев. – Ярославль : Ярославский гос. техн. ун-т, 2008. – 79 с.

3. Математическое описание процесса механического уплотнения тонкодисперсных материалов: монография / А. Б. Капранова, А. А. Мурашов, А. И. Зайцев, А. Е. Лебедев. – Ярославль : Ярославский гос. техн. ун-т, 2006. – 100 с.

4. Оборин, А. В. Математическая модель пневматического уплотнения порошков / А. В. Оборин, А. А. Мурашов // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 8-2. – С. 292 – 297.

5. Капранова, А. Б. Экспериментальные исследования процесса механического уплотнения тонкодисперсных материалов : монография / А. Б. Капранова, А. И. Зайцев, А. В. Оборин. – Ярославль : Ярославский гос. техн. ун-т, 2008. – 104 с.

To the Design of Equipment for Pneumatic Compaction of Fine Materials

A. V. Oborin[1], A. A. Murashov[2]

Department of Computer-Integrated Technology of Mechanical Engineering, oborinav@ystu.ru; Yaroslavl State Technical University (1); Department of Mathematics, Yaroslavl Higher Military School of Air Defense (2), Yaroslavl, Russia

Keywords: gas dynamic effects; mathematical model; equipment for pneumatic sealing; pneumatic seal (de-aeration); calculation; fine material.

Abstract: The process of pneumatic compaction of powders is considered. A mathematical model of the process of pneumatic compaction of powders is proposed, which includes a second-order partial differential equation, taking into account the change in the height of the powder layer, and setting the condition of equality to zero of the pressure drop at the upper moving boundary between the solid and gaseous phases. The system of equations is solved by numerical method. The study of the model showed that taking into account the change in the height of the powder layer can be essential to improve the efficiency of using equipment for pneumatic compaction of powders.

References

1. Akiyama T., Miyamoto Y., Yamanaka N., Zhang J.Q. Densification of Powders by Means of Air, Vibratory and Mechanical Compactions, *Powder Technol.*, 1986, vol. 46, no. 2-3, pp. 173-180, doi: 10.1016/0032-5910(86)80024-9

2. Kapranova A.B., Murashov A.A., Zaytsev A.I. *Inzhenernyy raschet uplotniteley poroshkov s suzhayushchimisya kanalami: monografiya* [Engineering calculation of powder compactors with tapering channels: monograph], Yaroslavl: Yaroslavskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet, 2008, 79 p. (In Russ.)

3. Kapranova A.B., Murashov A.A., Zaytsev A.I., Lebedev A.Ye. *Matematicheskoye opisaniye protsessa mekhanicheskogo uplotneniya tonkodispersnykh materialov: monografiya* [Mathematical description of the process of mechanical compaction of fine materials: monograph], Yaroslavl: Yaroslavskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet, 2006, 100 p. (In Russ.)

4. Oborin A.V., Murashov A.A. [Mathematical model of pneumatic compaction of powders], *Fundamental'nyye issledovaniya* [Fundamental research], 2017, no. 8-2, pp. 292-297. (In Russ., abstract in Eng.)

5. Kapranova A.B., Zaytsev A.I., Oborin A.V. *Eksperimental'nyye issledovaniya protsessa mekhanicheskogo uplotneniya tonkodispersnykh materialov: monografiya* [Experimental studies of the process of mechanical compaction of fine-dispersed materials: monograph], Yaroslavl: Yaroslavskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet, 2008, 104 p. (In Russ.)

Zur Konstruktion von Anlagen für pneumatische Verdichtung feinkörniger Materialien

Zusammenfassung: Der Prozess der pneumatischen Verdichtung von Pulvern ist betrachtet. Es ist ein mathematisches Modell des Prozesses der pneumatischen Verdichtung von Pulvern vorgeschlagen, das eine partielle Differentialgleichung zweiter Ordnung enthält, die die Änderung der Höhe der Pulverschicht berücksichtigt und die Gleichheitsbedingung des Differenzdrucks Null auf der oberen beweglichen Grenze zwischen der festen und der gasförmigen Phase aufweist. Das Gleichungssystem ist numerisch gelöst. Die Untersuchung des Modells zeigte, dass die Berücksichtigung der Änderung der Höhe der Pulverschicht wesentlich für die Verbesserung der Effizienz der Verwendung von Geräten zur pneumatischen Verdichtung von Pulvern sein kann.

Sur la conception de l'équipements de compactage pneumatique des matériaux fins

Résumé: Est examiné le processus de compactage pneumatique des poudres. Est proposé le modèle mathématique du processus de compactage pneumatique des poudres comprenant une équation dans les dérivées partielles du second ordre en tenant compte du changement de la hauteur de la couche de poudre avec une condition d'égalité de zéro chute de pression à l'interface mobile supérieure des phases solide et gazeuse. Le système d'équations est résolu par la méthode numérique. L'étude du modèle a montré que la prise en compte de la variation de la hauteur de la couche de poudre peut être essentielle pour améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'équipement de compactage pneumatique des poudres.

Авторы: ***Оборин Анатолий Владимирович*** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Компьютерно-интегрированная технология машиностроения», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Ярославль, Россия; ***Мурашов Анатолий Александрович*** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Математика», ФГКВОУ ВО «Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны», Ярославль, Россия.

УДК 517.518
DOI: 10.17277/vestnik.2022.03.pp.496-506

ОБОБЩЕННЫЕ ДРОБНЫЕ ИНТЕГРАЛЫ РЯДОВ ФУРЬЕ

А. Д. Нахман

Кафедра «Высшая математика», alextmb@mail.ru;
ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия

Ключевые слова: дробное интегрирование; оценки сильного и слабого типа; экспоненциальные методы суммирования.

Аннотация: Введено в рассмотрение семейство комплекснозначных экспоненциальных методов суммирования рядов Фурье и сопряженных рядов. Получено представление соответствующих операторов в виде суммы средних и сопряженных средних, определяемых действительнозначными суммирующими последовательностями. Установлены L^p-оценки сильного и слабого типа и получены условия суммируемости почти всюду в терминах квазивыпуклости метода суммирования. Результаты включают в себя L^p-ограниченность дробных интегралов ряда Фурье.

1. Постановка задачи

Рассмотрим произвольную 2π-периодическую суммируемую на $Q=[-\pi,\pi]$ функцию $f(x)$, ее коэффициенты Фурье

$$c_k(f)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(t)\exp(-ikt)\,dt\,, \tag{1.1}$$

ряд Фурье

$$s[f,x]=\sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k(f)\exp(ikx) \tag{1.2}$$

и сопряженный ряд

$$\tilde{s}[f,x]=-i\sum_{k=-\infty}^{\infty}(\operatorname{sgn}k)c_k(f)\exp(ikx)\,. \tag{1.3}$$

Будем считать, что среднее значение функции $f(x)$ на отрезке $[-\pi,\pi]$ равно нулю, так что $c_0(f)=0$. В этом случае определены операторы

$$I_h:\quad f\mapsto I_h[f,x]=\sum_{k|>0} c_k(f)\frac{\exp(ikx)}{(ik)^h}. \tag{1.4}$$

При $h=1$ ряд (1.4) представляет собою формально проинтегрированный ряд Фурье (точнее, одну из его первообразных), при $h=2,3,\ldots$ – результат двукратного, трехкратного, … интегрирования. При нецелых $h>0$ говорят, что $I_h[f,x]$ есть дробный интеграл ряда Фурье (см. [1, т. 1, с. 200–201]). Если при этом устремить h к нулю, то естественно ожидать, что в пределе будут получаться значения $f(x)$. Ряд (1.4) можно рассматривать как результат применения к (1.2) метода суммирования $\lambda=\{\lambda_k(h)\}$, определяемого последовательностью

$$\lambda_k(h)=\exp(-h\ln ik),\ \ k=1,2,\ldots. \tag{1.5}$$

Близкая задача об экспоненциальных методах суммирования рассматривалась в [2, 3]. А именно, изучались семейства средних

$$U_h\left(f,x;\lambda^{\#}\right)=\sum_{k=-\infty}^{\infty}\lambda_k^{\#}(h)c_k(f)\exp(ikx),\ \ \ h>0 \tag{1.6}$$

ряда (1.2) и средних

$$\tilde{U}_h\left(f,x;\lambda^{\#}\right)=-i\sum_{k=-\infty}^{\infty}(\operatorname{sgn}k)\lambda_k^{\#}(h)c_k(f)\exp(ikx),\ \ h>0 \tag{1.7}$$

сопряженного ряда Фурье (1.3) в случае $\lambda_k^{\#}(h)=\exp(-h\varphi(|k|)$. При этом функция $\varphi(x)$ с действительными значениями предполагалась непрерывной, возрастающей к $+\infty$ на $[0,+\infty)$, дважды дифференцируемой на $(0,+\infty)$ и $\varphi(0)=0$. Именно такие функции будем рассматривать на протяжении всей настоящей работы. В случае же (1.5) имеем комплексную экспоненту

$$\lambda_k(h)=\exp\left(-h\left(\ln|k|+i\frac{\pi}{2}\operatorname{sgn}k\right)\right),\ \ k=\pm1,\ \pm2,\ldots. \tag{1.8}$$

Как установлено в [1, т. 2, с. 201], интегральное ядро средних (1.4) линейным образом выражается через интегральные ядра (1.6) и (1.7), где $\varphi(|k|)=\ln|k|$. Получим, прежде всего, аналогичный результат в более общем направлении, рассматривая

$$\lambda_k(h)=\exp\left(-h(\varphi(k)+i\psi(k)\right),\ \ k=\pm1,\ \pm2,\ldots \tag{1.9}$$

и ограничиваясь случаем четной φ и нечетной ψ, $\varphi(0)=\psi(0)=0$ (что выполнено, в частности, для (1.8)).

Следующим шагом будет получение L^p-оценок λ-средних сильного и слабого типа. Наконец, мы придем к утверждению о сходимости при $h\to+0$ семейства обобщенных дробных интегралов.

Отметим, что непосредственно ряд Фурье как аппарат аппроксимации функций, вообще говоря, не пригоден в силу известных примеров расходящихся рядов Фурье (см.[1, т. 1, гл. 8, с. 470 – 494]).

2. Редукция к исследованию средних ряда Фурье и сопряженного ряда

Положим $\mu=\{\mu_k(\varphi,\psi;h)\}$, $\nu=\{\nu_k(\varphi,\psi;h)\}$, $k=0,\pm1,\pm2,\ldots;$ здесь

$$\mu_k(\varphi,\psi;h)=\cos(h\psi(k))\exp(-h\varphi(k)),\quad \nu_k(\varphi,\psi;h)=\sin(h\psi(k))\exp(-h\varphi(k)) \tag{2.1}$$

Лемма 2.1. Пусть последовательность $\{\lambda_k(h)\}$ определена соотношением (1.9), среднее значение функции $f(x)$ на отрезке $[-\pi,\pi]$ равно нулю и

$$J_h(f)=J_h(f,x;\lambda)=\sum_{k=-\infty}^{\infty}\lambda_k(h)c_k(f)\exp(ikx)\,. \tag{2.2}$$

Тогда

$$J_h(f,x;\lambda)=U_h(f,x;\mu)+\tilde{U}_h(f,x;\nu)\,. \tag{2.3}$$

Доказательство. Согласно (1.1), (1.9) и в силу нечетности функции ψ, имеем (2.2) в виде

$$\begin{aligned}
J_h(f,x;\lambda)&=\sum_{k=-\infty}^{\infty}\frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi}f(x-t)\exp i(kt-h\psi(k))\exp(-h\varphi(k))\,dt=\\
&=\frac{1}{\pi}\sum_{k=1}^{\infty}\exp(-h\varphi(k))\int_{-\pi}^{\pi}f(x-t)\frac{\exp i(kt-h\psi(k))+\exp i(-kt+h\psi(k))}{2}dt=\\
&=\frac{1}{\pi}\sum_{k=1}^{\infty}\exp(-h\varphi(k))\int_{-\pi}^{\pi}f(x-t)\cos(kt-h\psi(k))\,dt=\\
&=\frac{1}{\pi}\sum_{k=1}^{\infty}\cos(h\psi(k))\exp(-h\varphi(k))\int_{-\pi}^{\pi}f(x-t)\cos kt\,dt+\\
&\quad+\frac{1}{\pi}\sum_{k=1}^{\infty}\sin(h\psi(k))\exp(-h\varphi(k))\int_{-\pi}^{\pi}f(x-t)\sin kt\,dt.
\end{aligned} \tag{2.4}$$

Используя обозначения (2.1) и добавляя к сумме в правой части (2.4) нулевое слагаемое

$$\frac{\mu_0(\varphi,\psi,h)}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi}f(x-t)\,dt\,,$$

получим

$$\begin{aligned}
J_h(f,x;\lambda)=\frac{\mu_0(\varphi,\psi;h)}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi}f(x-t)dt+\sum_{k=1}^{\infty}\mu_k(\varphi,\psi;h)\frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi}f(x-t)\cos kt\,dt+\\
+\sum_{k=1}^{\infty}\nu_k(\varphi,\psi;h)\frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi}f(x-t)\sin kt\,dt.
\end{aligned} \tag{2.5}$$

В правой части (2.5) мы узнаем сумму μ-средних ряда Фурье функции f и ν-средних сопряженного ряда (см. (1.6) и (1.7)), записанных в интегральной форме (см. также [2]), чем и завершается доказательство (2.3).

3. L^p-оценки

Пусть

$$\|f\|_p=\left(\int_{-\pi}^{\pi}|f(x)|^p dx\right)^{1/p}$$

– норма в Лебеговом пространстве $L^p=L^p(Q)$ $(p>0;\ \ L=L^1;\ \|f\|=\|f\|_1)$.

Для любой последовательности $\xi = \{\xi_k(h)\}$ рассмотрим ее первые и вторые конечные разности

$$\Delta\xi_k(h) = \xi_k(h) - \xi_{k+1}(h),\ \ \Delta\xi_k^2(h) = \Delta(\Delta\xi_k(h)),\ \ k = 0, 1, \dots .$$

Положим

$$\sum(\xi, h) = \sum_{k=0}^{\infty}(k+1)\left|\Delta^2\xi_k(h)\right|, \quad \sum{}^*(\xi) = \sup_{h>0}\sum(\xi, h)$$

и

$$J_*(f, \lambda) = J_*(f, x; \lambda) = \sup_{h>0}|J_h(f, x; \lambda)|.$$

Теорема 3.1. Пусть

$$\left(|\mu_k(\varphi,\psi,h)| + |\nu_k(\varphi,\psi;h)|\right)\ln k = O_h(1),\ h > 0. \tag{3.1}$$

Тогда имеют место оценки

$$\|J_*(f;\lambda)\|_p \le C_p\left(\sum{}^*(\mu) + \sum{}^*(\nu)\right)\|(f)\|_p, \quad p > 1; \tag{3.2}$$

$$\|J_*(f;\lambda)\| \le C\left(\sum{}^*(\mu) + \sum{}^*(\nu)\right)\left(1 + \|f(\ln^+|f|)\|\right); \tag{3.3}$$

$$\|J_*(f;\lambda)\|_p \le C_p\left(\sum{}^*(\mu) + \sum{}^*(\nu)\right)\|(f)\|,\ \ 0 < p < 1. \tag{3.4}$$

Кроме того, справедлива следующая оценка слабого типа:

$$|x \in Q \mid J_*(f, x; \lambda) > \eta > 0| \le C\left(\sum{}^*(\mu) + \sum{}^*(\nu)\right)\frac{\|f\|}{\eta}, \quad p \ge 1. \tag{3.5}$$

Здесь и в дальнейшем через C обозначаем постоянные, различные, вообще говоря, в различных формулах и зависящие лишь от явно указанных индексов.

Доказательство. Согласно (2.3) рассмотрение сводится к верхним оценкам для $\sup_{h>0}|U_h(f, x; \mu)|$ и $\sup_{h>0}|\tilde{U}_h(f, x; \nu)|$. Можно считать $\sum{}^*(\mu) + \sum{}^*(\nu) < \infty$, иначе утверждения теоремы очевидны.

В работе [2] при условии (3.1) установлено, что

$$\sup_{h>0}|U_h(f, x; \mu)| \le C_\mu \sum{}^*(\mu) f^*(x) \tag{3.6}$$

и

$$\sup_{h>0}|\tilde{U}_h(f, x; \nu)| \le C_\nu \sum{}^*(\nu)\left(f^*(x) + Tf(x)\right), \tag{3.7}$$

где максимальные функции в правой частях неравенств (3.6), (3.7) определены соотношениями:

$$f^* = f^*(x) = \sup_{h>0}\frac{1}{h}\int_{x-h}^{x+h}|f(t)|\,dt \tag{3.8}$$

и

$$Tf = Tf(x) = \sup_{h>0}\left|\int_{h\le|t|\le\pi}\frac{f(x+t)}{2tg\,\frac{t}{2}}dt\right|. \tag{3.9}$$

Известно [1, т. 1, с. 54 – 61 и с. 442–443], что для L^p -норм (3.8), (3.9) имеют место оценки типа (3.2) – (3.5) с постоянными C_p, зависящими только от соответствующих p (суммы $\sum^*(\mu)$ и $\sum^*(\nu)$ в оценках для f^* и Tf, очевидно, отсутствуют). Теперь утверждения (3.2) – (3.5) вытекают из (3.6) и (3.7). Теорема 3.1 доказана.

Интересно отметить следующее обстоятельство. Как известно [4, т. 1, с. 27 – 30], в гармоническом анализе важную роль играют операторы сдвига, определяемые для каждой $f \in L$ в виде

$$\tau_h(f): f(x) \mapsto f(x-h) \sim \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k(f)\exp(-ikh)\exp(ikx), \quad h>0. \tag{3.10}$$

Семейство операторов (2.2)

$$J_h(f): f(x) \mapsto J_h(f, x; \lambda) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k(f)\exp\big(-h(\varphi(k)+i\psi(k))\big)\exp(ikx) \tag{3.11}$$

включает в себя (3.10) и может рассматриваться как обобщение класса операторов сдвига, что повышает интерес к исследованию поведения (3.11).

4. Оценки сильного и слабого типа: частный случай

Рассмотрим наиболее простой, но и наиболее интересный для наших целей случай $\psi(k) = \omega \operatorname{sgn} k$, $k = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots$, где $\omega > 0$ – абсолютная постоянная. В этом случае утверждение леммы 2.1 принимает вид

$$J_h(f, x; \lambda) = \cos(h\omega) U_h(f, x; \xi) + \sin(h\omega)\, \tilde{U}_h(f, x; \xi), \tag{4.1}$$

где, как указано выше (см.(1.9)),

$$\lambda_k(h) = \exp(-h(\varphi(k) + i\omega \operatorname{sgn} k)), \quad k = \pm 1, \pm 2, \ldots \tag{4.2}$$

и

$$\xi_k(h) = \exp(-h\varphi(k)), \quad k = \pm 1, \pm 2, \ldots. \tag{4.3}$$

Отметим, что в интегральной форме (2.4) преобразуется к виду

$$J_h(f, x; \lambda) = \cos(h\omega)\sum_{k=1}^{\infty}\exp(-h\varphi(k))\frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(x-t)\cos kt\, dt +$$
$$+ \sin(h\omega)\sum_{k=1}^{\infty}\exp(-h\varphi(k))\frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(x-t)\sin kt\, dt.$$

Из результата (4.1) вытекает теперь такой частный случай теоремы 3.1

Теорема 4.1. Пусть последовательности $\lambda = \{\lambda_k(h)\}$ и $\xi = \{\xi_k(h)\}$ определены соотношениями (4.2) и (4.3) соответственно. Тогда при условии

$$\xi_k(h)\ln k = O_h(1), \quad h > 0 \tag{4.4}$$

имеют место оценки:

$$\| J^*(f; \lambda) \|_p \le C_p \sum^*(\xi) \| (f) \|_p, \quad p > 1; \tag{4.5}$$

$$\| J^*(f; \lambda) \| \le C \sum^*(\xi)(1 + \| f(\ln^+ |f|) \|); \tag{4.6}$$

$$\| J_*(f;\lambda)\|_p \le C_p \sum{}^*(\xi)\|(f)\|, \quad 0<p<1; \tag{4.7}$$

$$|\, x\in Q \mid J_*(f,x;\lambda)>\eta>0| \le C\sum{}^*(\xi)\,\frac{\|f\|}{\eta}, \quad p\ge 1. \tag{4.8}$$

5. Сходимость средних

Теорема 5.1. Пусть для последовательности (4.3) выполнены условия (4.4) и

$$\sum{}^*(\xi)<+\infty. \tag{5.1}$$

Тогда соотношение

$$\lim_{h\to+0} J_h(f)=f \tag{5.2}$$

имеет место почти всюду в Q для каждой $f\in L$ и в метрике $L^p=L^p(Q)$ при любом $p>1$.

Доказательство. В работе [2] установлен следующий общий факт. Пусть произвольная последовательность действительных чисел $\xi=\{\xi_k(h)\}$ удовлетворяет условиям (4.4), (5.1) и

$$\xi_0(h)=1, \quad \lim_{k\to+\infty}\xi_k(h)=0 \ \ (h>0), \quad \lim_{h\to 0}\xi_k(h)=1, \quad k=0,1,\ldots. \tag{5.3}$$

Тогда соотношения:

$$\lim_{h\to 0} U_h(f)=f; \tag{5.4}$$

$$\lim_{h\to 0} \tilde{U}_h(f)=\tilde{f} \tag{5.5}$$

справедливы почти всюду в Q для всякой $f\in L(Q)$ и в метрике каждого из пространств $L^p=L^p(Q)$, $p>1$. Здесь

$$\tilde{f}(x)=-\frac{1}{2}\lim_{\varepsilon\to+0}\int\limits_{\varepsilon\le|t|\le\pi} f(x+t)\operatorname{ctg}\frac{t}{2}\,dt \tag{5.6}$$

– сопряженная функция; функция (5.6) существует почти всюду для каждой $f\in L$ ([1, т. 1, с. 402]).

Очевидно, что условия (5.3) выполнены в случае последовательности (4.3) с учетом условий на функцию $\varphi(x)$, наложенных выше.

Теперь утверждение (5.2) теоремы является прямым следствием соотношений (5.4), (5.5) и (4.1).

6. Случай выпуклых и кусочно-выпуклых последовательностей

В настоящем пункте речь пойдет о последовательностях $\xi=\{\xi_k(h)\}$, у которых вторые разности не меняют свой знак или меняют его конечное число раз. Обсудим, как в этом случае могут быть реализованы условия (5.1) и (4.4). В работе [3] установлено, что если равномерно по k и h имеет место соотношение

$$|\,\xi_k(h)\,|+k\,|\,\Delta\xi_k(h)\,|=O(1), \tag{6.1}$$

то выполнено условие (5.1). В частном же случае выпуклых (вогнутых) последовательностей ограничение (6.1) можно снять (см. [1, т. 1, с. 155–156]).

Для суммирующей последовательности (4.3) очевидно, что

$$\xi_k(h) = \frac{1}{\exp(h\varphi(k))} \le \frac{1}{\exp(h\varphi(0))} = 1 .$$

Далее, $k\Delta\xi_k(h)$ есть значение функции $x\exp(-h\varphi(x))(-h\varphi'(x))$, поэтому условие (6.1) теперь сведено к виду

$$hx\varphi'(x)\exp(-h\varphi(x)) = O(1) , \tag{6.2}$$

причем оценка (6.2) предполагается равномерной по x и h .

Проверка выпуклости (кусочной выпуклости) последовательности (4.3) в терминах функции $\varphi(x)$ сводится к исследованию знаков выражения (см. [2])

$$\left(\exp\left(-h\varphi(x)\right)\right)'' = h\exp\left(-h\varphi(x)\right)\left(h\left(\varphi'(x)\right)^2 - \varphi''(x)\right). \tag{6.3}$$

Наконец, условие (4.4) принимает вид

$$\exp(-h\varphi(x))\ln x = O_h(1) . \tag{6.4}$$

В итоге, приходим к следующему результату. Если имеют место соотношения (6.2) и (6.4), а произведение (6.3) меняет знак конечное число раз, то справедливы утверждения разделов 4 и 5. Если же (6.3) знакопостоянно, то эти утверждения справедливы при одном лишь условии (6.4).

7. Предельное поведение дробных интегралов

Вернемся к случаю (1.5), рассматривая более общую последовательность

$$\lambda_k(h) = \exp\left(-h\left(\ln^\alpha |k| + i\frac{\pi}{2}\operatorname{sgn} k\right)\right), \quad k = \pm 1, \pm 2, \ldots, \quad \alpha > 0. \tag{7.1}$$

Установим, что для максимальных операторов $J_*(f,\lambda)$, определяемых последовательностью (7.1), имеют место L^p -оценки сильного и слабого типа (см. п. 4), а для $J_h(f,\lambda)$ справедливы утверждения о сходимости (5.2). Достаточно в случае $\varphi(x) = \ln^\alpha x$ исследовать знаки (6.3) и проверить условия (6.4) и (6.2).

Имеем

$$\begin{aligned} h(\varphi'(x))^2 - \varphi''(x) &= h\left(\frac{\alpha}{x}\ln^{\alpha-1} x\right)^2 - \left(-\frac{\alpha}{x^2}\ln^{\alpha-1} x + \frac{\alpha(\alpha-1)}{x^2}\ln^{\alpha-2} x\right) = \\ &= \frac{\alpha}{x^2}\ln^{\alpha-2} x\left(\alpha h\ln^\alpha x + \ln x - (\alpha-1)\right). \end{aligned} \tag{7.2}$$

При $0 < \alpha \le 1$ функция (7.2) сохраняет знак плюс; следовательно, последовательность $\xi = \{\exp(-h(\ln^\alpha k)\}$ выпукла. Если же $\alpha > 1$, то функция $\alpha h\ \ln^\alpha x - (\alpha-1) + \ln x$ возрастает с ростом x, а значит обращается в ноль ровно при одном значении x. Тогда последовательность ξ кусочно-выпукла. В обоих случаях проверяем (6.4), то есть

$$h\exp\left(-h\ln^\alpha x\right)\ln x = O_h(1), \quad x > 1 . \tag{7.3}$$

Согласно правилу Лопиталя, с ростом x левая часть (7.3) ведет себя как

$$\frac{hx^{-1}}{hx^{-1}\left(\ln^{\alpha-1} x\right)\exp\left(h\ln^{\alpha} x\right)} = \frac{\ln^{1-\alpha} x}{\exp\left(h\ln^{\alpha} x\right)}. \tag{7.4}$$

Отношение (7.4) есть $o_h(1)$ при $\alpha \geq 1$. В случае $0 < \alpha < 1$ к правой части (7.4) снова применим правило Лопиталя и так поступаем ν раз, где ν – наименьшее натуральное число, для которого $1 - \nu\alpha \leq 0$. В результате

$$\frac{\ln^{1-\nu\alpha} x}{h\exp\left(h\ln^{\alpha} x\right)} \to 0, \quad x \to +\infty,$$

откуда и получаем требуемую оценку (7.3).

Для случая $\alpha > 1$ остается проверить (6.2), то есть

$$hx\left(\frac{\alpha}{x}\ln^{\alpha-1} x\right)\exp\left(-h\ln^{\alpha} x\right) = O(1)$$

или

$$\frac{h\alpha\ln^{\alpha-1} x}{\exp\left(h\ln^{\alpha} x\right)} = O(1). \tag{7.5}$$

Левая часть (7.5) очевидно ограничена по h (с ростом h достаточно применить правило Лопиталя, но на самом деле интересен лишь случай близких к нулю h). Если же $x \to +\infty$, то после применения правила Лопиталя получаем

$$\frac{(\alpha-1)\ln^{-1} x}{\exp\left(h\ln^{\alpha} x\right)} \to 0, \quad x \to +\infty.$$

Значит, ограниченность по x также установлена.

Условия теорем 4.1 и 5.1, таким образом, выполнены.

Частным случаем доказанного утверждения является L^p-ограниченность $\sup\limits_{h>0} |I_h[f,x]|$ и сходимость

$$\lim_{h\to+0} I_h[f,x] = f(x)$$

почти всюду в Q для каждой $f \in L$ и в метрике $L^p = L^p(Q)$ при любом $p > 1$.

Заметим, что близкий результат (а именно L^p-ограниченность семейства дробных интегралов ряда Фурье-Гегенбауэра) был получен другим способом в работе [5, с. 75, теорема 12].

Другим примером метода суммирования (4.3), удовлетворяющего условиям теорем 4.1 и 5.1, может служить метод

$$\lambda_k(h) = \exp\left(-h\left(|k|^{\alpha} + i\frac{\pi}{2}\operatorname{sgn} k\right)\right), \quad k = \pm1, \pm2, \ldots, \quad \alpha > 0. \tag{7.6}$$

Здесь $\varphi(x) = x^{\alpha}$; очевидно, что выполнено (6.4):

$$\exp\left(-hx^{\alpha}\right)\ln x = O_h(1), \quad \text{если } x \to +\infty.$$

Далее (см. (6.3)),

$$h(\varphi'(x))^2 - \varphi''(x) = \alpha x^{\alpha-2}\left(\alpha h\ x^{\alpha} - (\alpha - 1)\right). \tag{7.7}$$

При $0 < \alpha \le 1$ функция (7.7) сохраняет знак плюс; следовательность $\xi = \{\exp(-h\,|\,k\,|^{\alpha})\}$ выпукла. Если же $\alpha > 1$, то выражение (7.7), возрастая с ростом x, обращается в ноль ровно при одном значении x. Тогда последовательность ξ кусочно-выпукла.

Наконец (см. (6.2)), произведение $hx\varphi'(x)\exp(-h\varphi(x)) = hx^{\alpha}\exp\left(-hx^{\alpha}\right)$ равномерно ограничено как выражение вида $t\exp(-t)$, $t > 0$.

Таким образом, для метода суммирования (7.6) справедливы утверждения теорем 4.1 и 5.1.

8. Поведение дробных интегралов сопряженного ряда Фурье

Применим теперь метод суммирования (4.2) к сопряженному ряду Фурье (1.3), рассматривая семейство операторов $f \mapsto \tilde{J}_h(f)$, где

$$\tilde{J}_h(f) = \tilde{J}_h(f, x; \lambda) = -i\sum_{k=-\infty}^{\infty}(\operatorname{sgn} k)\lambda_k(h)c_k(f)\exp(ikx). \tag{8.1}$$

Получим, прежде всего, соответствующий аналог утверждения леммы 2.1. С учетом (1.1) будем иметь следующее представление (8.1):

$$\begin{aligned}
\tilde{J}_h(f, x; \lambda) &= -i\sum_{k=-\infty}^{\infty}(\operatorname{sgn} k)\frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(x-t)\exp i(kt - h\omega\operatorname{sgn} k)\exp(-h\varphi(k))\,dt = \\
&= \frac{1}{\pi}\sum_{k=1}^{\infty}\exp(-h\varphi(k))\int_{-\pi}^{\pi} f(x-t)\frac{\exp i(kt - h\omega) - \exp i(-kt + h\omega)}{2i}\,dt = \\
&= \frac{1}{\pi}\sum_{k=1}^{\infty}\exp(-h\varphi(k))\int_{-\pi}^{\pi} f(x-t)\sin(kt - h\omega)\,dt = \\
&= \frac{1}{\pi}\sum_{k=1}^{\infty}\cos(h\omega)\exp(-h\varphi(k))\int_{-\pi}^{\pi} f(x-t)\sin kt\,dt - \\
&- \frac{1}{\pi}\sum_{k=1}^{\infty}\sin(h\omega)\exp(-h\varphi(k))\int_{-\pi}^{\pi} f(x-t)\cos kt\,dt = \\
&= \cos(h\omega)\tilde{U}_h(f, x; \xi) - \sin(h\omega)U_h(f, x; \xi),
\end{aligned} \tag{8.2}$$

где последовательность ξ определена соотношением (4.3). Положим

$$\tilde{J}_*(f, \lambda) = \tilde{J}_*(f, x; \lambda) = \sup_{h>0}|\,\tilde{J}_h(f, x; \lambda)\,|.$$

Принимая во внимание соотношение (8.2) и оценки (3.6), (3.7), получаем следующий аналог теоремы 4.1.

Теорема 8.1. Пусть выполнено условие (4.4). Тогда утверждения (4.5) – (4.8) имеют место с заменой $J_*(f,\lambda)$ на $\tilde{J}_*(f,\lambda)$.

Используя представление (8.2) и соотношения (5.4), (5.5), приходим к следующему аналогу теоремы 5.1.

Теорема 8.2. Пусть для последовательности (4.3) выполнены условия (4.4) и (5.1). Тогда соотношение

$$\lim_{h\to+0}\tilde{J}_h(f)=\tilde{f}$$

имеет место почти всюду в Q для каждой $f\in L$ и в метрике $L^p=L^p(Q)$ при любом $p>1$.

Список литературы

1. Зигмунд, А. Тригонометрические ряды : в 2 томах / А. Зигмунд ; пер. с англ. – М. : Мир, 1965. – Т. 1. – 615 с. ; Т. 2. – 537 с.

2. 10. Нахман, А. Д. Экспоненциальные методы суммирования рядов Фурье / А. Д. Нахман, Б. П. Осиленкер // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2014. – Т. 20, № 1. – С. 101 – 109.

3. Осиленкер, Б. П. Задачи, ассоциированные с представлением Дирихле полугруппы операторов / Б. П. Осиленкер, А. Д. Нахман // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2018. – Т. 24, № 3. – С. 492 – 511. doi: 10.17277/vestnik.2018.03.pp.492-511

4. Эдвардс, Р. Ряды Фурье в современном изложении : в 2 томах / Р. Эдвардс ; пер. с англ. – М. : Мир, 1985. – Т. 1. – 264 с. ; Т. 2. – 400 с.

5. Muckenhoupt, B. Classical Expansions and Their Relation to Conjugate Harmonic Functions / B. Muckenhoupt, E. M. Stein // Trans. Amer. Math. Soc. – 1965. – Vol. 118, No. 6. – P. 17 – 92. doi: 10.1090/S0002-9947-1965-0199636-9

Generalized Fractional Integrals of the Fourier Series

A. D. Nakhman

Department of Higher Mathematics, alextmb@mail.ru;
TSTU, Tambov, Russia

Keywords: fractional integration; estimates of strong and weak type; exponential summation methods.

Abstract: A family of complex-valued exponential summation methods for Fourier series and conjugate series is introduced. A representation of the corresponding operators as a sum of means and conjugate means determined by real-valued summing sequences is obtained. The L^p-estimates of strong and weak types were establish and conditions for summability almost everywhere in terms of the quasi-convexity of the summation method were found. The results include the L^p-boundedness of the fractional integrals of the Fourier series.

References

1. Zygmund A. *Trigonometric series*, Cambridge University Press, 1959.

2. Nakhman A.D., Osilenker B.P. [Exponential methods of summation of Fourier series], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2014, vol. 20, no. 1, pp. 101-109. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Osilenker B.P., Nakhman A.D. [Problems associated with the Dirichlet representation of a semigroup of operators], *Transactions of the Tambov State Technical University,* 2018, vol. 24, no. 3, pp. 492-511, doi: 10.17277/vestnik.2018.03.pp.492-511 (In Russ., abstract in Eng.)

4. Edwards R.E. *Fourier Series: A Modern Introduction*, Springer-Verlag, 1979, vol. 1, 1982, vol. 2.

5. Muckenhoupt B., Stein E.M. Classical Expansions and Their Relation to Conjugate Harmonic Functions, *Transactions of the American Mathematical Society*, 1965, vol. 118, no. 6, pp.17-92, doi: 10.1090/S0002-9947-1965-0199636-9

Verallgemeinerte Bruchintegrale von Fourier-Reihen

Zusammenfassung: Eine Familie komplexer exponentieller Methoden zur Summierung von Fourier-Reihen und verknüpften Reihen ist in Betracht gezogen. Es ist eine Darstellung der entsprechenden Operatoren als Summe der Mittelwerte und konjugierter Mittelwerte erhalten, die durch tatsächliche Summensequenzen definiert werden. L^p-Bewertungen des starken und schwachen Typs sind festgelegt und die Summierbarkeitsbedingungen sind fast überall in Bezug auf die Quasikonvexität der Summierungs-Methode erhalten. Die Ergebnisse umfassen die L^p-Limitierung von Bruchintegralen der Fourier-Reihe.

Intégrales fractionnaires généralisées des séries de Fourier

Résumé: Est introduite dans l'examination la famille des méthodes exponentielles complexes de sommation des séries de Fourier et des séries conjuguées. Est obtenue une représentation des opérateurs correspondants sous la forme d'une somme des moyennes et des moyennes conjuguées définies par des séquences de sommation à valeur réelle. Sont établies les valeurs L^p des types fort et faible sommabilité; sont obtenues presque partout les conditions de sommabilité sont obtenues en termes de quasi-bulle de la méthode de sommation. Les résultats incluent la limite L^p des intégrales fractionnaires de la série de Fourier.

Автор: ***Нахман Александр Давидович*** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Высшая математика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

УДК 004.021
DOI: 10.17277/vestnik.2022.03.pp.507-519

ПРОВЕДЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ВЕРТИКАЛЬНО-ФРЕЗЕРНЫХ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ

В. А. Немтинов[1], В. А. Парсков[1], А. Б. Борисенко[1], Ю. В. Немтинова[2]

Кафедра «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении» (1), nemtinov@mail.tstu.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия;
кафедра «Менеджмент, маркетинг и реклама» (2), jnemtinova@hotmail.com; ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина», Тамбов, Россия

Ключевые слова: вертикально-фрезерный обрабатывающий центр с ЧПУ Challenger MCV-2418; информационно-логическая модель; принятие решений; техническое обслуживание и ремонт.

Аннотация: Рассмотрен подход к управлению техническим обслуживанием и ремонтом станков с числовым программным управлением (ЧПУ), базирующийся на использовании теории построения экспертных систем. Поставлена и решена задача оптимального выбора мероприятий при проведении технического обслуживания и ремонта сложного оборудования с ЧПУ. Рассмотрены вопросы построения информационно-логической модели поддержки принятия решений при его проведении, позволяющей в зависимости от текущего состояния узлов станка и технических условий изготовления деталей найти оптимальный вариант проведения технического обслуживания и наладки вертикально-фрезерных обрабатывающих центров с ЧПУ. Разработан программный комплекс, реализующий решение поставленной задачи, который апробирован при проведении технического обслуживания и ремонта вертикально-фрезерного обрабатывающего центра с ЧПУ Challenger MCV-2418.

Введение

С развитием науки и техники технология производства продукции на оборудовании с числовым программным управлением (**ЧПУ**) стала одной из незаменимых важных технологий в обрабатывающей промышленности. Станки с ЧПУ являются актуальным производственным оборудованием, и их надежность напрямую влияет на качество продукции. Техническое обслуживание данного типа оборудования играет стратегическую роль в функционировании машиностроительного предприятия и может составлять значительную часть стоимости жизненного цикла продукта. Внедрение эффективной системы управления техническим обслуживанием позволяет понимать его значение в глобальном масштабе благодаря интеграции знаний и информации, полученных различными участни-

ками (например, операторами, командой технического обслуживания, производителем станков с ЧПУ) и источниками (автоматическими аварийными сигналами, отчетами группы технического обслуживания, руководства).

Авторами многих работ рассмотрены различные подходы к созданию автоматизированных систем технического обслуживания сложного оборудования. Так в работе [1] предложен подход для поддержки принятия решений по автоматизированному планированию технического обслуживания оборудования с ЧПУ исследовательского центра. Основная структура системы управления техническим обслуживанием основана на классификации работ по техническому обслуживанию; распределении этих работ между различными сервисными подразделениями в соответствии с требуемыми знаниями и безопасностью; планировании профилактических вмешательств; определении вариантов контрольного списка и настраиваемых ответов для консолидации выполнения работ по техническому обслуживанию и обучении команды технического обслуживания. Основными результатами являются отслеживание мероприятий по техническому обслуживанию для обеспечения задач по его выполнению в соответствии с требованиями производителей станков с ЧПУ, а также вовлечение операторов станков в техническое обслуживание своего оборудования для повышения производительности производства и надежности активов. Фактически, данный подход обеспечивает методологию для тех компаний, которые впервые рассматривают возможность улучшения планирования технического обслуживания, позволяя конечному пользователю получить базовое техническое обслуживание оборудования вместе с гарантией начала накопления данных о техническом обслуживании.

Как отмечают авторы работ [2, 3], неразумная стратегия технического обслуживания увеличивает затраты на его проведение и может значительно снизить эффективность станков с ЧПУ. Следовательно, для получения научной и разумной стратегии технического обслуживания на системном уровне следует учитывать не только состояние износа узлов, но и их взаимное влияние с другими узлами станков с ЧПУ. Износ оборудования влияет на качество производимой продукции, поскольку с увеличением износа увеличивается количество дефектов [3]. Авторами предлагается стратегия группового обслуживания станков с ЧПУ, учитывающая экономическую зависимость, структурную и стохастическую зависимости между критическими узлами, и оптимизирует стратегию группового обслуживания. Модель группового технического обслуживания станков с ЧПУ состоит из четырех подмоделей: подмодели износа узлов, подмодели решения о групповом техническом обслуживании, подмодели процесса технического обслуживания, подмодели затрат на техническое обслуживание. Используя модель группового технического обслуживания станков с ЧПУ, время и цели его проведения могут быть определены в зависимости от степени износа узлов. И затем можно рассчитать стоимость каждого технического обслуживания. В модели группового обслуживания экономическая зависимость и структурная зависимость между компонентами количественно определяются стоимостью, в то время как стохастическая зависимость количественно определяется интенсивностью отказов. В данном случае используется метод Монте-Карло для моделирования процесса работы станка и рассчитываются долгосрочные затраты на техническое обслуживание станков с ЧПУ, соответствующие определенному порогу интенсивности отказов. Наконец, генетический алгоритм используется для оптимизации пороговых значений интенсивности отказов при профилактическом обслуживании и групповом обслуживании.

В связи с отсутствием данных мониторинга и неясным пониманием механизма износа элементов станков с ЧПУ в работе [4] предложен метод оценки рабочего состояния и принятия решений по техническому обслуживанию станков с ЧПУ с несколькими состояниями, основанный на частично наблюдаемом про-

цессе принятия решений цепей Маркова. С одной стороны, учитывая несовершенную оперативную информацию о станках с ЧПУ и влияние различных мероприятий по техническому обслуживанию на процесс износа станков, построена динамическая модель оценки их рабочего состояния. С другой, разработана модель принятия решений по техническому обслуживанию станков с ЧПУ с целью минимизации общей стоимости потерь (включая затраты на техническое обслуживание и потенциальные затраты на отказы).

Принятие решений по техническому обслуживанию в крупных производственных системах является сложным процессом, поскольку требует интеграции различной информации [5 – 7]. Политика ограниченного контроля популярна на практике. Техническое обслуживание выполняется тогда, когда состояние износа станка с ЧПУ достигает порогового значения. Авторы, разрабатывая структуру, основанную на моделях цепей Маркова с дискретным временем, оценивали производительность системы в рамках политики ограничения контроля в производственных системах, состоящих из станков с ЧПУ с несколькими состояниями.

В передовых производственных системах станки с ЧПУ являются важным оборудованием для изготовления компонентов изделий высокой точности, в то время как с точки зрения обслуживания оборудования они рассматриваются как «продукты», предоставляемые производителями станков. В работе [8] представлена новая система планирования технического обслуживания, основанная на знаниях, для облегчения обмена информацией и знаниями между всеми заинтересованными сторонами, включая производителей станков, пользователей (производственные системы), поставщиков услуг по техническому обслуживанию и поставщиков деталей (для станков), в рамках формирующейся бизнес-модели «Продукт-услуга». Для повышения эффективности планирования технического обслуживания внедрены принципы обоснования, основанные на конкретных примерах.

С точки зрения жизненного цикла изделия, дорогостоящие и сложные станки с ЧПУ являются одновременно оборудованием и продукцией, надежность которых влияет не только на качество изготавливаемых деталей, но и на прибыль поставщиков оборудования. Эффективное техническое обслуживание и сервисное обслуживание играют важную роль в повышении надежности оборудования и повышении эффективности производства. Повторное использование исторических знаний – эффективный способ решения новых проблем и повышения эффективности технического обслуживания. Авторами работы [9], исходя из рассуждений, основанных на конкретных примерах, принята двухуровневая онтология для представления экспертных знаний с использованием поиска, ориентированного на адаптацию. На основе семантического сходства и корреляции выбран наиболее адаптивный исторический случай для решения текущей новой проблемы.

Анализ литературы показал, что в настоящее время используется несколько подходов автоматизации процессов принятия решений при проведении технического обслуживания и ремонта сложного оборудования с ЧПУ в зависимости от конкретных условий реализации производства машиностроительной продукции. В связи с этим предложен подход к управлению техническим обслуживанием станков с ЧПУ, базирующийся на использовании теории построения экспертных систем [10 – 12], который проиллюстрирован на примере вертикально-фрезерных обрабатывающих центров. На оборудовании данного типа осуществляются различные процессы обработок:

– обработка поверхностей фрезой в радиальном направлении;
– фрезерование пазов, окон, уступов, нарезание резьбы и т.д.;
– сверление сквозных и глухих отверстий;
– развертывание;
– обработка расточными резцами в заданный размер.

Следует отметить, что какое бы совершенное станочное оборудование не выпускалось, операции по его регулировке, настройке и контролю над технологическими параметрами будут присутствовать всегда. Это связано и с износом рабочих органов, и различием технологий изготовления деталей. Поэтому специалистам по техническому обслуживанию нужны глубокие знания не только по конструкции, теории производственных процессов в токарных станках, но и умение выполнять регулировку и настройку в зависимости от свойств и состояния обрабатываемого материала, технического состояния, износа деталей, узлов и механизмов [13 – 15].

Системы технического обслуживания вертикально-фрезерных обрабатывающих центров

Техническое обслуживание станков с ЧПУ включает в себя совокупность организационных и технических мероприятий, обеспечивающих поддержание их выходных параметров на заданном уровне в течение всего периода эксплуатации; осмотр и контроль технического состояния станка и системы управления: чистку, замену смазочно-охлаждающей жидкости, промывку и смазывание механизмов станка и элементов системы управления; замену износившихся деталей, узлов механизмов и вышедших из строя элементов и блоков управления станком; проверку гидро- и электроприводов. Для каждого станочного оборудования характерно ухудшение технических параметров в процессе эксплуатации, что выражается в естественном изменении геометрии, то есть детали станка, подвергаясь механическим и эрозионным воздействиям, в течение времени меняются в размерах. В результате чего параллельность конструкции нарушается, что, безусловно, сказывается на жесткости станка в целом и приводит к поломке станка.

Причины аварий и поломок вертикально-фрезерных обрабатывающих центров с ЧПУ:

1. Конструктивные недостатки:

– конструкции узлов и их крепления, а также системы смазки; недостаточная жесткость и виброустойчивость; отсутствие предохранительных устройств и т.д.;

– конструкции деталей (неправильное назначение допусков, режимов термообработки, размеров и геометрической формы и т.д.);

2. Дефекты изготовления металла (дефекты качества материала, литья и заготовок) и сборки станка (некачественные пригонка сопрягаемых деталей и разводка пневмо- и гидросистем станка; утечка смазочных масел; наличие посторонних предметов и стружки);

3. Некачественный уход за станком:

– содержание оборудования в грязном состоянии (попадание влаги, пыли и стружки между трущимися деталями станка);

– отсутствие или некачественная смазка (отсутствие масла в емкостях станка; неисправность насоса или его привода; засоренность маслопровода; применение загрязненного масла или масла несоответствующей вязкости);

4. Неправильная наладка:

– некачественная наладка и регулировка (применение подач, глубины резания и скоростей свыше расчетных; применение незаточенного, режущего инструмента).

Для реализации на станках с ЧПУ всех фрезерных работ необходима их тщательная подготовка и наладка, качественное проведение которых в оптимальные сроки положительно отразится на готовой детали.

Задача оптимального выбора мероприятий при проведении технического обслуживания и ремонта станков с ЧПУ

В формализованном виде постановку задачи оптимального выбора мероприятий при проведении технического обслуживания и ремонта станков с ЧПУ в зависимости от их текущего состояния представим так: нужно найти такой перечень мероприятий, чтобы при выполнении условий

$$Tx_i^{\min} \le Tx_i \le Tx_i^{\max}, \quad i = 1,\ 2,\ \ldots,\ N\ , \tag{1}$$

оператора, представляющего математическую модель поддержки принятия решения при проведении технического обслуживания и ремонта станков с ЧПУ, включающую в себя информацию об их деталях и узлах, текущем состоянии, способах устранения неисправностей, характеристиках процессов технического обслуживания и ремонта, справедливо следующее положение:

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

Критерий оптимальности Q представлен в виде суммы относительных потерь критериев, взятых с определенными значениями их важности: ориентировочных затрат на реализацию процессов технического обслуживания и ремонта станков с ЧПУ, технологичности и безопасности процессов их проведения:

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

где ρ_1, ρ_2, ρ_3 − весовые коэффициенты, заданные экспертами.

$$\rho = \left\{ \rho_j : \rho_j \ge 0,\ \ j = 1, 2, 3;\ \sum_{j=1}^{3} \rho_j = 1 \right\}\ , \tag{4}$$

где Tx_i , $Tx_i^{\min}$, $Tx_i^{\max}$ – соответственно текущее и предельные значения i-ой характеристики станка с ЧПУ; N – количество характеристик; $\rho_j \varpi_j(k)$ − взвешенные потери по каждому j-му критерию; $\rho_j \varpi_j(k) = \varpi_j(F_j(k)),\ \ j = 1, \ldots 3,\ \ k \in K$ − функциональные зависимости, преобразующие соответствующие функции $F_j(k)$ к безразмерному виду; $F_1(k)$ − ориентировочные затраты на реализацию процессов технического обслуживания и ремонта станков с ЧПУ; $F_2(k)$, $F_3(k)$ – соответственно значения технологичности и безопасности процессов их проведения. Для функции $F_1(k)$ будем искать минимум, а для функций $F_2(k)$, $F_3(k)$ − максимум.

Функциональные зависимости, преобразующие функции $F_j(k)$ к безразмерному виду следующим образом:

$$\varpi_1(k) = \frac{F_1(k) - F_1^0}{F_1^{\max} - F_1^0}\ ;\ \ \varpi_l(k) = \frac{F_l^0(k) - F_l(k)}{F_l^0 - F_l^{\min}}\ ;\ \ l = 2, 3, \tag{5}$$

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

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

Для каждого k-го формируемого перечня мероприятий ориентировочная стоимость $F_1(k)$ представляет собой сумму стоимостей отдельных мероприятий, а $F_2(k)$ и $F_3(k)$ вычисляются соответственно как произведения значений технологичности и безопасности проведения процессов отдельных мероприятий, входящих в k-й вариант формируемого перечня.

Для поиска оптимального варианта перечня мероприятий при проведении технического обслуживания и ремонта станков с ЧПУ, удовлетворяющих нормативным требованиям, разработана информационно-логическая модель поддержки принятия решений, включающая в себя множество продукционных правил [16 – 19].

В качестве примера приведем ряд правил, с помощью которых можно сформировать перечень мероприятий при техническом обслуживании и ремонте станков с ЧПУ. Продукционные правила, входящие в состав модели, построены по типу: *если … (условия выполняются), то … (реализация следствия)*.

В настоящее время база содержит более 250 правил, конкретный вид которых рассмотрен применительно к вертикально-фрезерным обрабатывающим центрам с ЧПУ, в частности станку Challenger MCV-2418 (рис. 1.). Правила собраны экспертами и авторами в процессе контактов с операторами-наладчиками вертикально-фрезерных обрабатывающих центров:

а) *Правила выбора мероприятий при устранении брака при работе на вертикально-фрезерном обрабатывающем центре с ЧПУ Challenger MCV-2418:*

1) *если* «брак при растачивании отверстий» = «расточенное отверстие получилось овальной формы», *то* «биение оправки» = «замена оправки»;

2) *если* «брак при растачивании отверстий» = «расточенное отверстие получилось овальной формы», *то* «некорректные режимы резания» = «корректировка режимов резания»;

3) *если* «брак при растачивании отверстий» = «расточенное отверстие получилось овальной формы», *то* «биение шпинделя» = «замена подшипников и шеек»;

4) *если* «брак при растачивании отверстий» = «обработанная поверхность получилась нечистой», *то* «сколол резец» = «проверить резец, при необходимости переточить, заменить на новый»;

Рис. 1. Общий вид вертикально-фрезерного обрабатывающего центра с ЧПУ Challenger MCV-2418

5) *если* «брак при растачивании отверстий» = «обработанная поверхность получилась нечистой», *то* «большая подача резца» = «проверить правильность выбора подачи, провести чистовую обработку»;

6) *если* «брак при подрезании торцов и уступов» = «неперпендикулярное расположение торца или уступа к оси детали», *то* «неправильная установка резца» = «проверка правильности установки резца»;

7) *если* «брак при фрезеровании» = «фрезерованная поверхность имеет наплыв металла», *то* «затупилась фреза» = «заточить фрезу»;

8) *если* «брак при фрезеровании» = «фрезерованная поверхность имеет наплыв металла», *то* «затупилась фреза» = «поставить новую фрезу»;

9) *если* «брак при фрезеровании» = «фрезерованная поверхность имеет неверные размеры», *то* «неверная привязка нулей в системе координат» = «проверить привязку, при необходимости перепривязаться»;

10) *если* «брак при фрезеровании» = «фрезерованная поверхность имеет неверные размеры», *то* «неверная привязка инструмента» = «проверить привязку, при необходимости перепривязаться»;

11) *если* «брак при фрезеровании» = «фрезерованная поверхность имеет неверные размеры», *то* «неверная привязка инструмента» = «проверить привязку инструмента»;

12) *если* «брак при фрезеровании» = «фрезерованная поверхность имеет неверные размеры», *то* «неверное значение корректора инструмента» = «проверить корректор инструмента»;

13) *если* «брак при фрезеровании» = «фрезерованная поверхность имеет неверные размеры», *то* «проверить «базу» на наличие стружки» = «продуть «базу» от стружки»;

…

б) *Правила выбора мероприятий при неисправностях на вертикально-фрезерном обрабатывающем центре с ЧПУ Challenger MCV-2418:*

– при неисправностях шпинделя (рис. 2):

24) *если* «неисправность шпинделя» = «повышенное радиальное биение», *то* «изогнутость рабочего вала» = «правка вала шпинделя»;

25) *если* «неисправность шпинделя» = «повышенное радиальное биение», *то* «недостаточная затяжка подшипников, зазоры» = «регулировка подшипников, подтяжка гайки затяжки подшипников»;

26) *если* «неисправность шпинделя» = «шум в верхнем подшипнике», *то* «диагностика подшипника» = «промывка подшипника от грязи с заменой смазки или замена подшипника»;

– при неисправностях шарико-винтовой пары (**ШВП**) (рис. 3):

27) *если* «неисправность винта ШВП» = «незначительное ухудшение системы позиционирования», *то* «износ винта ШВП» = «компенсация осей станка»;

28) *если* «неисправность винта ШВП» = «серьезное ухудшение системы позиционирования», *то* «износ винта ШВП» = «замена винта ШВП»;

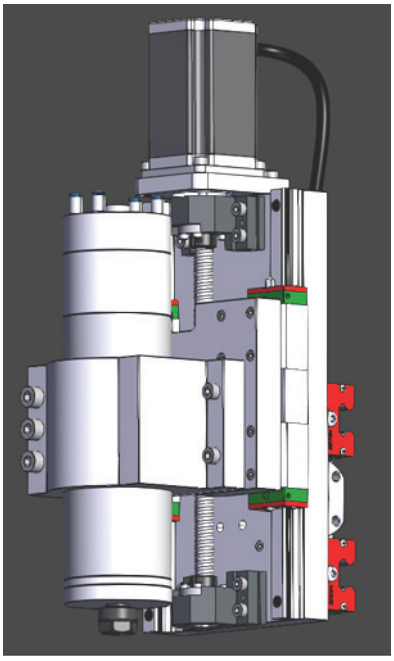
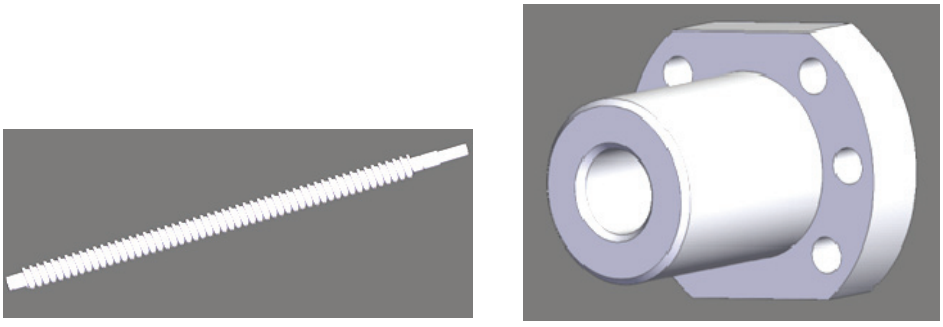


Рис. 2. Модель шпинделя



а) *б*)

Рис. 3. Модели шарико-винтовой пары:
а – винт; *б* – гайка

29) *если* «неисправность гайки ШВП» = «незначительное ухудшение системы позиционирования», *то* «износ шарикоподшипников» = «компенсация осей станка»;

30) *если* «неисправность гайки ШВП» = «серьезное ухудшение системы позиционирования», *то* «диагностика шарикоподшипников» = «промывка шарикоподшипников с заменой смазки или замена шарикоподшипников»;

– при неисправностях опоры универсальной фиксирующей (рис. 4):

31) *если* «неисправность опоры» = «ухудшение системы позиционирования», *то* «износ подшипника» = «замена подшипника»;

32) *если* «неисправность опоры» = «повышенное радиальное биение», *то* «износ подшипника» = «замена подшипника»;

33) *если* «неисправность опоры» = «несоосность осей валов», *то* «износ подшипника» = «замена подшипника»;

…

Информация о характеристиках каждого мероприятия приведена в табл. 1.

В результате реализации модели поддержки принятия решений по выбору оптимального варианта мероприятий технического обслуживания и ремонта станков с ЧПУ осуществляется формирование множество мероприятий, обладающих разной эффективностью. В настоящее время размерность множества сформированных мероприятий не превышает тысячи, поэтому поиск оптимального варианта осуществляется методом полного их перебора.

Авторами разработан программный комплекс, реализующий решение задачи (1) – (5), и апробирован при проведении технического обслуживания и ремонта вертикально-фрезерного обрабатывающего центра с ЧПУ Challenger MCV-2418.

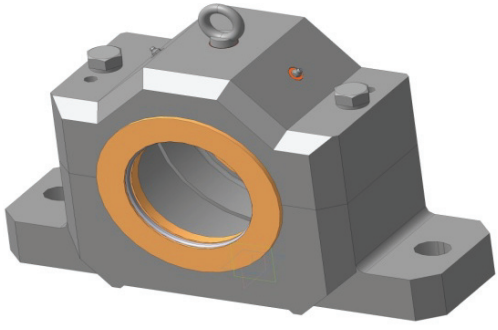


Рис. 4. Модель опоры универсальной фиксирующей

Таблица 1

Фрагмент базы характеристик мероприятий при проведении технического обслуживания и ремонта станков с ЧПУ

Номер правила	Технологичность (баллы от 1 до 10)	Ориентировочная стоимость мероприятия, р.	Безопасность замены (баллы от 1 до 10, где 10 – полная безопасность, 1 – серьезная травма рабочего)
…	…	…	…
24	8	32 000	8
25	8	15 000	7
26	7,6	30 000	8
27	10	11 000	9,8
28	4	55 000	6
29	10	11 000	9,8
30	4	24 000	7
31	5	27 000	7
32	5	27 000	7
…	…	…	…

Заключение

В результате проведенных исследований разработан подход к управлению техническим обслуживанием и ремонтом станков с ЧПУ, базирующийся на использовании теории построения экспертных систем. Поставлена и решена задача оптимального выбора мероприятий при проведении технического обслуживания и ремонта сложного оборудования с ЧПУ. Рассмотрены вопросы построения информационно-логической модели поддержки принятия решений при их проведении, позволяющей в зависимости от текущего состояния узлов станка и технических условий изготовления деталей найти оптимальный вариант проведения технического обслуживания и наладки вертикально-фрезерных обрабатывающих центров с ЧПУ. Апробация разработанного программного комплекса, реализующего решение задачи (1) – (5) при проведении технического обслуживания и ремонта вертикально-фрезерного обрабатывающего центра с ЧПУ Challenger MCV-2418, показала высокую эффективность предложенного подхода.

Список литературы

1. Implementation of a Maintenance Management System for CNC Machines / J. Rossi, A. Bianchini, S. Cortesi [et al.] // Proceedings of the Summer School Francesco Turco. – 2021. – P. 271549.

2. Group Maintenance Strategy of CNC Machine Tools Considering Three Kinds of Maintenance Dependence and Its Optimization / J. Sun, Z. Sun, C. Chen [et al.] // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2021. – URL : https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-021-07752-6 (дата обращения: 25.08.2022).

3. Hajej, Z. Quality Issue in Forecasting Problem of Production and Maintenance Policy for Production Unit / Z. Hajej, N. Rezg, A. Gharbi // International Journal of Production Research. – 2018. – Vol. 56, No. 18. – P. 6147 – 6163.

4. Zixuan, F. Operational State Evaluation and Maintenance Decision-making Method for Multi-state CNC Machine Tools Based on Partially Observable Markov Decision Process / F. Zixuan, W. Xiaodong, W. Lifang // Proceedings of 2020 International Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control (SDPC), 05 – 07 August, 2020, Beijing, China. – IEEE, 2020. – P. 120 – 124. doi: 10.1109/SDPC49476.2020.9353134

5. Gu, X. Performance Evaluation for Manufacturing Systems under Control-Limit Maintenance Policy / X. Gu, W. Guo, X. Jin // Journal of Manufacturing Systems. – 2020. – Vol. 55. – P. 221 – 232. doi: 10.1016/j.jmsy.2020.03.003

6. Patil, R. B. Integrated Reliability and Maintainability Analysis of Computerized Numerical Control Turning Center Considering the Effects of Human and Organizational Factors / R. B. Patil // Journal of Quality in Maintenance Engineering. – 2020. – Vol. 26, No. 1. – P. 87 – 103. doi: 10.1108/JQME-08-2018-0063

7. Xing, J. A Hybrid Multi-Objective Algorithm for Energy-Efficient Scheduling Considering Machine Maintenance / J. Xing, F. Qiao, H. Lu // IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), 22 – 26 August 2019, Vancouver, BC, Canada. – IEEE, 2019. – P. 115 – 120. doi: 10.1109/COASE. 2019.8843144

8. A Knowledge Based Machine Tool Maintenance Planning System Using Case-Based Reasoning Techniques / S. Wan, D. Li, J. Gao, J. Li // Robotics and Computer Integrated Manufacturing. – 2019. – Vol. 58. – P. 80 – 96. doi: 10.1016/ j.rcim.2019.01.012

9. Maintenance and Service Knowledge Reusing for CNC Machine Tools / S. Wan, D. Li, F. He, Y. Tong // Computer Integrated Manufacturing Systems. – 2018. – Vol. 24, No. 9. – P. 2254 – 2269. doi: 10.13196/j.cims.2018.09.013

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

11. Рыбина, Г. В. Применение интеллектуального анализа данных для построения баз знаний интегрированных экспертных систем / Г. В. Рыбина // Авиакосмическое приборостроение. – 2012. – № 11. – С. 36 – 53.

12. Мокрозуб, В. Г. Системный анализ процессов принятия решений при разработке технологического оборудования / В. Г. Мокрозуб, Е. Н. Малыгин, С. В. Карпушкин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 3. – С. 364 – 373. doi: 10.17277/vestnik.2017.03.pp.364-373

13. Краснянский, М. Н. Математическое моделирование адаптивной системы управления профессиональным образованием / М. Н. Краснянский, А. И. Попов, А. Д. Обухов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 2. – С. 196 – 208. doi: 10.17277/vestnik.2017.02.pp.196-208

14. Мокрозуб, В. Г. Постановка задачи разработки математического и информационного обеспечения процесса проектирования многоассортиментных химических производств / В. Г. Мокрозуб, Е. Н. Малыгин, С. В. Карпушкин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 2. – С. 252 – 264. doi: 10.17277/vestnik. 2017.02.pp.252-264

15. Nemtinov, K. Rationale Construction of Individual Elements of Technological Complex / K. Nemtinov, A. Eruslanov, Yu. Nemtinova // MATEC Web of Conferences : International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018), 10 – 14 September, 2018, Sevastopol. – Sevastopol, 2018. – Vol. 224. – P. 02036. doi: 10.1051/e3sconf/201912600003

16. Nemtinov, V. A. On an Approach to Designing a Decision Making System for State Environmental Examination / V. A. Nemtinov, Yu. V. Nemtinova // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2005. – Vol. 44, No. 3. – P. 389 – 398.

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

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

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

Maintenance and Repair of Vertical Milling Machining Centers Using Software Tools

V. A. Nemtinov[1], V. A. Parskov[1], A. B. Borisenko[1], Yu. V. Nemtinova[2]

Department of Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering (1), nemtinov@mail.tstu.ru; TSTU, Tambov, Russia;
Department of Management, Marketing and Advertising (2), Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russia

Keywords: CNC vertical milling center Challenger MCV-2418; information-logical model; making decisions; maintenance and repair.

Abstract: An approach to the management of maintenance and repair of machine tools with numerical control (CNC), based on the use of the theory of building expert systems, is considered. The problem of the optimal choice of measures for the maintenance and repair of complex CNC equipment has been posed and solved. The issues of building an information-logical model for decision support during its implementation, which allows, depending on the current state of the machine components and the technical conditions for manufacturing parts, to find the best option for maintenance and adjustment of CNC vertical milling machining centers are considered. A software package that implements the solution of the task has been developed; it was tested during the maintenance and repair of the vertical milling machining center with CNC Challenger MCV-2418.

References

1. Rossi J., Bianchini A., Cortesi S., Naisson P., Atieh S. Implementation of a Maintenance Management System for CNC Machines, *Proceedings of the Summer School Francesco Turco*, 2021, p. 271549.

2. https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-021-07752-6 (accessed 25 August 2022).

3. Hajej Z., Rezg N., Gharbi A. Quality Issue in Forecasting Problem of Production and Maintenance Policy for Production Unit, *International Journal of Production Research*, 2018, vol. 56, no. 18, pp. 6147-6163.

4. Zixuan F., Xiaodong W., Lifang W. Operational State Evaluation and Maintenance Decision-making Method for Multi-state CNC Machine Tools Based on Partially Observable Markov Decision Process, Proceedings of 2020 International

Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control (SDPC), 05 - 07 August, 2020, Beijing, China, IEEE, 2020, pp. 120-124, doi: 10.1109/SDPC49476. 2020.9353134

5. Gu X., Guo W., Jin X. Performance Evaluation for Manufacturing Systems under Control-Limit Maintenance Policy, *Journal of Manufacturing Systems*, 2020, vol. 55, pp. 221-232, doi: 10.1016/j.jmsy.2020.03.003

6. Patil R.B. Integrated Reliability and Maintainability Analysis of Computerized Numerical Control Turning Center Considering the Effects of Human and Organizational Factors, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 2020, vol. 26, no. 1, pp. 87-103, doi: 10.1108/JQME-08-2018-0063

7. Xing J., Qiao F., Lu H. A Hybrid Multi-Objective Algorithm for Energy-Efficient Scheduling Considering Machine Maintenance, IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), 22 - 26 August 2019, Vancouver, BC, Canada, IEEE, 2019, pp. 115-120, doi: 10.1109/COASE.2019.8843144

8. Wan S., Li D., Gao J., Li J. A Knowledge Based Machine Tool Maintenance Planning System Using Case-Based Reasoning Techniques, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 2019, vol. 58, pp. 80-96, doi: 10.1016/j.rcim.2019.01.012

9. Wan S., Li D., He F., Tong Y. Maintenance and Service Knowledge Reusing for CNC Machine Tools, *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2018, vol. 24, no. 9, pp. 2254-2269, doi: 10.13196/j.cims.2018.09.013

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

11. Rybina G.V. [Application of data mining for building knowledge bases of integrated expert systems], *Avia-kosmicheskoye priborostroyeniye* [Aerospace instrumentation], 2012, no. 11, pp. 36-53. (In Russ., abstract in Eng.)

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

13. Krasnyanskiy M.N., Popov A.I., Obukhov A.D. [Mathematical modeling of an adaptive system of professional education management], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 2, pp. 196-208, doi: 10.17277/vestnik.2017.02.pp.196-208 (In Russ., abstract in Eng.)

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

15. Nemtinov K., Eruslanov A., Nemtinova Yu. Rationale Construction of Individual Elements of Technological Complex, MATEC Web of Conferences: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018), 10 - 14 September, 2018, Sevastopol, 2018, vol. 224, p. 02036, doi: 10.1051/e3sconf/201912600003

16. Nemtinov V.A., Nemtinova Yu.V. On an Approach to Designing a Decision Making System for State Environmental Examination, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2005, vol. 44, no. 3, pp. 389-398.

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

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

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

Durchführung der Wartung und Reparatur von Vertikal-Fräsbearbeitungszentren mit Software-Tools

Zusammenfassung: Es ist ein Ansatz für die Steuerung von Wartung und Reparatur von numerisch gesteuerten Maschinen (CNC) betrachtet, der auf der Theorie des Aufbaus von Expertensystemen basiert. Gestellt und gelöst ist das Problem der optimalen Auswahl von Maßnahmen zur Wartung und Reparatur komplexer CNC-Anlagen. Es ist die Problematik des Aufbaus eines informationslogischen Modells zur Entscheidungsunterstützung während seiner Implementierung betrachtet, das es ermöglicht, abhängig vom aktuellen Zustand der Maschinenkomponenten und den technischen Bedingungen für die Herstellung von Teilen, die beste Option für die Wartung und Anpassung der CNC-Vertikalfräsbearbeitung zu finden. Es ist ein Softwarepaket entwickelt, das die Lösung der Aufgabe umsetzt und bei der Wartung und Reparatur eines vertikalen Fräsbearbeitungszentrums mit CNC-Herausforderer MCV-2418 getestet worden ist.

Entretien et réparation des centres d'usinage de fraisage vertical avec l'utilisation des logiciels

Résumé: Est examinée une approche de la gestion de l'entretien et de la réparation des machines à commande numérique (CNC) basée sur l'utilisation de la théorie de la construction de systèmes experts. Est également résolu le problème du choix optimal des activités de maintenance et de réparation d'équipements CNC complexes. Sont examinées les questions de la construction d'un modèle d'information-logique d'aide à la décision lors de sa réalisation ce qui permet, en fonction de l'emplacement actuel des nœuds de la machine et des conditions techniques de fabrication des pièces, de trouver une option pour la maintenance et la mise en place des centres d'usinage CNC. Est mis en oeuvre un ensemble de logiciels qui permet la solution de la tâche et qui est testé lors de l'entretien et la réparation du centre d'usinage de fraisage vertical CNC Challenger MCV-2418.

Авторы: ***Немтинов Владимир Алексеевич*** – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; ***Парсков Вадим Александрович*** – магистрант; ***Борисенко Андрей Борисович*** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия; ***Немтинова Юлия Владимировна*** – кандидат экономических наук, доцент кафедры менеджмента, маркетинга и рекламы, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина», Тамбов, Россия.

НАШИ НОВЫЕ ПРОФЕССОРА, ДОКТОРА И КАНДИДАТЫ НАУК

NEW PROFESSORS, DOCTORS AND CANDIDATES OF SCIENCES

Жуков Валентин Михайлович

Zhukov Valentine

Доцент кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов.

08.12.2021 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.05 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитил диссертацию на тему «Методология синтеза информационно-измерительных и управляющих систем с настраиваемой структурой и гибкими чувствительными элементами» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальностям 05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы (технические науки), 05.12.07 – Антенны. СВЧ-устройства и их технологии (технические науки).

Работа выполнена на кафедре «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» в ФГБОУ ВО «ТГТУ».

Научный консультант – д-р техн. наук, профессор Д. Ю. Муромцев.

В диссертационной работе впервые определен и обоснован новый класс цифровых информационно-измерительных и управляющих систем с настраиваемой структурой и гибкими чувствительными элементами. Разработаны методы синтеза таких систем с распределенными и сосредоточенными элементами настройки, в том числе методы синтеза измерителей, повышения быстродействия, точности и энергетической эффективности. Разработан метод исследования устойчивости в переходном и установившемся режимах работы цифровых многомерных многосвязных управляющих систем с вычислительным алгоритмом управления на основе удачного совмещения положений теории вероятности и теории автоматического управления с использованием двумерного Z-преобразования и преобразования Лапласа. Проведены экспериментальные исследования, результаты которых подтвердили достоверность теоретических исследований.

Научные результаты диссертации положены в основу разработки новых систем радиосвязи ВЧ – УВЧ диапазонов с фазированными антенными решетками.

Приказом Минобрнауки России от 28.03.2022 года № 300/нк-7 В. М. Жукову присуждена ученая степень доктора технических наук.

Область научных исследований: методы анализа и синтеза информационно-измерительных и управляющих систем с повышенной энергетической эффективностью.