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

2020. Том 26. № 1.

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

СОДЕРЖАНИЕ

Автоматика. Информатика. Управление. Приборы 6

Селиванова З. М., Куренков Д. С. Интеллектуальная информационно-измерительная система дистанционного контроля теплофизических свойств теплоизоляционных материалов в условиях воздействия дестабилизирующих факторов 6

Лоскутова А. Д., Королев А. П., Чернышов В. Н. Первичный измерительный преобразователь бесконтактного контроля инфракрасного излучения 20

Буланова В. О. Применение метода импульсного источника тепла для контроля влажности растительных тканей яблок 26

Матвейкин В. Г., Немтинов В. А., Дмитриевский Б. С., Лемкина М. В., Терехова А. А., Правин П. К. Управление ресурсным планированием проектов на примере составления производственного расписания 33

Немтинов В. А., Немтинова Ю. В., **Манаенков И. М.** Разработка прототипа виртуальной технологической лаборатории по изучению процессов производства органических красителей 43

Салих Х. С., Егоров С. Я. Построение системы мониторинга выполнения плановых работ на распределенных объектах (*на английском языке*) 56

Поляков Д. В., Попов А. И. Оптимизация управления финансовой деятельностью на основе теории нечетких множеств 64

Алгазин Е. И. Динамика параметров оценки состояния линейных систем автоматики 79

Процессы и аппараты химических и других производств. Химия 85

Леонтьев В. К., Кораблева О. Н. Интенсификация процесса выпаривания кристаллизующихся растворов 85

Голованчиков А. Б., Дулькин Т. А., Прохоренко Н. А., Меренцов Н. А. Оптимизация технологических параметров и диаметра трубопровода с учетом энерго- и ресурсосбережения 91

Лебедев А. Е., Ватагин А. А., Лебедев Д. В., Гуданов И. С. Математическое описание процесса распыла компонентов смеси в центробежном аппарате 100

Максимова Е. А., Маркова А. А., Маркова А. В. Исследование теплопередачи в блочном микроканальном теплообменнике 106

CONTENTS

Automation. InformationTechnology. Control. Instruments 6

Selivanova Z. M., Kurenkov D. S. Intelligent Information-Measuring System for Remote Control of the Thermophysical Properties of Insulating Materials under the Influence of Destabilizing Factors 6

Loskutova A. D., Korolev A. P., Chernyshov V. N. Non-Contact Infrared Sensor Primary Transmitter 20

Bulanova V. O. Using the Method of Pulsed Heat Source to Control the Moisture of Plant Tissues of Apples 26

Matveykin V. G., Nemtinov V. A., Dmitrievsky B. S., Lemkina M. V., Terekhova A. A., Pravin P. K. Resource Planning of Projects Using the Example of Industrial Project Scheduling 33

Nemtinov V. A., Nemtinova Yu. V., Manaenkov I. M. Development of a Prototype of a Virtual Technological Laboratory for the Study of the Processes of Production of Organic Dyes 43

Salih H. S., Egorov S. Ya. Development of a Monitoring System for Scheduled Works at Distributed Facilities (*in English*) 56

Polyakov D. V., Popov A. I. Optimization of Financial Management Based on the Theory of Fuzzy Sets 64

Algazin E. I. Dynamics of Parameters for Assessing the State of Linear Automation Systems 79

Chemical and Related Engineering. Chemistry 85

Leontyev V. K., Korableva O. N. Intensification of the Process of Evaporation of Crystallizing Solutions 85

Golovanchikov A. B., Dulkin T. A., Prokhorenko N. A., Merentsov N. A. Optimization of Technological Parameters and Diameter of the Pipeline, Taking into Account Energy and Resource Conservation 91

Lebedev A. E., Vatagin A. A., Lebedev D. V., Gudanov I. S. Mathematical Description of the Process of Spraying the Components of the Mixture in a Centrifugal Apparatus 100

Maksimova E. A., Markova A. A., Markova A. V. Research into Heat Transfer in the Block Microchannel Heat Exchanger 106

Математика. Физика 118

Пчелинцев А. Н., Ахмад С. Решение уравнения Дуффинга методом степенных рядов (*на английском языке*) 118

Материаловедение. Нанотехнологии 124

Дадашев Р. Х., Алчагиров Б. Б., Элимханов Д. З., Талхигова Х. С., Дадашева З. И. Температурная зависимость поверхностного натяжения эвтектического сплава 124

Ярцев В. П., Кузнецов В. А. Влияние климатических воздействий на теплофизические свойства утеплителя Austrothermc отделкой из цементно-шлакового раствора 133

Ерофеев А. В., Михайлов В. А. Повышение эксплуатационных характеристик битума марки БН 90/10 путем его наполнения стеклянным порошком 140

Информация 150

Рецензия на учебник «Источники вторичного электропитания» (*Д. Ю. Муромцев, С. В. Пономарев*) 150

Наши новые профессора, доктора и кандидаты наук 152

Указатели к тому 25, 2019 156

Содержание тома 25, 2019 156

Алфавитный указатель авторов 163

Mathematics. Physics 118

Pchelintsev A. N., Ahmad S. Solution of the Duffing Equation by the Power Series Method (*in English*) 118

Material Science. Nanotechnology 124

Dadashev R. Kh., Alchagirov B. B., Elimkhanov D. Z., Talkhigova H. S., Dadasheva Z. I. Temperature Dependence of Surface Tension of Eutectic Alloy 124

Yartsev V. P., Kuznetsov V. A. Effect of Climate on Thermophysical Properties of Austrotherm Insulation with a Cement Slag Finish 133

Erofeev A. V., Mikhailov V. A. Improving the Performance Characteristics of BN 90/10 Brand Bitumen by Filling it with Glass Powder 140

Information 150

Review of the Textbook "Secondary Power Sources" (*D. Yu. Muromtsev, S. V. Ponomarev*) 150

New Professors, Doctors and Candidates of Sciences 152

Indexes to Volume 25, 2019 156

Contents to Volume 25, 2019 156

Author Index 163

Автоматика. Информатика. Управление. Приборы

УДК 681.5.08
DOI: 10.17277/vestnik.2020.01.pp.006-019

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ

З. М. Селиванова, Д. С. Куренков

Кафедра «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», selivanova@mail.jesby.tstu.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия

Ключевые слова: дестабилизирующие факторы; дистанционный режим контроля; допусковый контроль; комплекс теплофизических свойств; теплоизоляционные строительные материалы.

Аннотация: Предложена методика разработки математической модели интеллектуальной информационно-измерительной системы (ИИИС) и ее структуры, предназначенной для оперативного и точного неразрушающего контроля теплофизических свойств (ТФС) энергетически эффективных теплоизоляционных материалов (ТМ) в режиме дистанционного контроля. Математическая модель процессов измерений в интеллектуальной системе при дистанционном контроле комплекса ТФС исследуемых материалов представлена в виде функциональной зависимости выходных сигналов структурных компонентов измерительного канала информационно-измерительной системы от воздействия входных сигналов с учетом параметров и характеристик компонентов системы, влияющих дестабилизирующих факторов. Создана математическая модель допускового контроля ТФС ТМ, применяемая в ИИИС дистанционного мониторинга для обеспечения качества выпускаемых материалов на производстве.

Введение

При строительстве зданий и сооружений основным фактором, влияющим на их стоимость, долговечность, энергосбережение и экологическую безопасность, является качество применяемых материалов. Снизить затраты на отопление до 40 % и в 4 – 6 раз сократить энергопотери возможно, применяя тепловую изоляцию зданий и сооружений при использовании энергоэффективных теплоизоляционных материалов. Энергосбережение обеспечивается при теплоизоляции внешних и внутренних конструкций объектов и теплоподводящих магистралей теплоизоляционными материалами, которые могут сохранять свои теплоизоляционные свойства не менее 80 лет.

В настоящее время быстрыми темпами растут цены на энергоносители, поэтому задача улучшения энергоэффективности зданий и сооружений является важной и актуальной. Решение задачи возможно при использовании в строительстве объектов качественных теплоизоляционных материалов: минераловатных плит и матов, пенопластов и других, с теплопроводностью в диапазоне 0,03…0,06 Вт/(м·К). Для оценки качества материалов находится один из важнейших параметров – их теплопроводность, которая определяется различными информационно-измерительными системами (**ИИС**). Применение интеллектуальной ИИС (**ИИИС**) для дистанционного контроля теплофизических свойств (**ТФС**) теплоизоляционных материалов (**ТМ**) позволит повысить их качество.

Дистанционный мониторинг качества ТМ зданий, сооружений и других объектов в различных условиях эксплуатации, при воздействии дестабилизирующих факторов актуален и необходим для своевременного обнаружения нарушений надлежащей теплоизоляции объектов.

Известны следующие ИИС: TRSYS01, предложенная компанией Hukseflux (Делфт, Нидерланды); UnithermTM 2022 [1]. Системы весьма точно определяют теплопроводность материалов, но недостаточно оперативно. В работе [2] рассмотрена ИИС с элементами искусственного интеллекта, определяющая теплопроводность материалов оперативно, но отсутствует дистанционный контроль теплопроводности. Интеллектуальные информационно-измерительные системы с использованием методов искусственного интеллекта рассмотрены в работах известных зарубежных ученых, основоположников интеллектуальных измерений, систем интеллектуального окружения и интеллектуальных сред [3]. Вопросы создания интеллектуальных средств измерений изложены в работе [4]. Анализ работ показывает, что представленные ИИИС имеют недостаточно высокое быстродействие и значительную погрешность измерений исследуемых параметров, обусловленную воздействием дестабилизирующих факторов. Рассмотрение известных ИИИС дистанционного контроля (**ДК**) ТМ показывает, что существенный их недостаток – недостаточная точность.

Цель исследования – повышение точности дистанционного контроля качественных свойств ТМ с использованием ИИИС в условиях воздействия дестабилизирующих факторов.

Задачи дистанционного контроля отражают концепцию комплексного применения методов дистанционного контроля, аппаратных и программных средств, методов искусственного интеллекта для телеметрического сбора измерительной информации от датчиков, контролирующих теплофизические свойства ТМ в дистанционном режиме. Применение распределенной объектно-ориентированной ИИИС неразрушающего контроля ТФС ТМ, создание телекоммуникационной среды позволит выполнять непрерывный или периодический мониторинг и анализ качественных свойств энергоэффективных материалов [5, 6].

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: разработать математические модели ИИИС дистанционного контроля ТМ, процесса теплофизического измерения в ИИИС, допускового контроля теплофизических свойств ТМ, а также создать структуру ИИИС, функционирующую в дистанционном режиме. Решение поставленных задач основано на использовании теорий теплопроводности и систем, методов искусственного интеллекта.

Математическая модель интеллектуальной информационно-измерительной системы дистанционного контроля теплоизоляционных материалов

Построение модели ИИИС основано на трех составляющих: цели, окружающей среде, внутреннем состоянии измерительного средства. Разработка математической модели системы предполагает предварительные процессы формирова-

ния архитектуры и алгоритма работы ИИИС ДК ТФС материалов; разработки компонентов измерительной системы и алгоритмов их информационного обмена с учетом окружающей среды при обработке измерительных данных в интеллектуальной системе.

Для создания модели системы определяются: методы для проведения дистанционного контроля параметров теплофизических свойств теплоизоляционных материалов и метрологических анализов результатов измерений; ряд переменных математической модели ИИИС; сведения о параметрах структурных компонентов системы; информация о дестабилизирующих факторах (**ДФ**) и критериях оценки работы системы; априорные данные об исследуемых материалах (**ИМ**) и формируемых измерительных ситуациях (**ИС**). Также необходимо выполнить оценку достаточности полученных данных об исследуемых материалах, измерительной ситуации, дестабилизирующих факторах, проведенной классификации теплоизоляционных материалов. Оценка качественных параметров и эффективность процессов работы ИИИС с учетом влияния ДФ выполняется с помощью выбранной совокупности критериев.

Достоверность приведенной концепции формирования математической модели позволяет выполнить оценку разрабатываемой модели. При оценке модели проверяются поставленные задачи, достоверность априорных данных, методика создания модели, параметры входящих в модель переменных, полученные аппроксимирующие зависимости.

Необходимость учета воздействия множества влияющих внешних факторов, которые оказывают влияние на принятие решения в интеллектуальной информационно-измерительной системе и обеспечение адекватности математической модели ИИИС, обуславливает задачу применения нечетких моделей при моделировании интеллектуальной системы.

С использованием предложенной методики для точного и достоверного определения комплекса ТФС теплоизоляционных материалов разработана математическая модель интеллектуальной информационно-измерительной системы в виде кортежа множеств

$$\mathbf{M}_{\text{ИИИС}} = \left\langle \mathbf{X}, \mathbf{V}_{\text{ДФ}}, \mathbf{V}_{\text{М}}, \mathbf{V}_{\text{пр}} \right\rangle,$$

где $\mathbf{X} = \{X_i, i = 1, \ldots, 3\}$ – множество входных воздействий (T_i – температура, τ_i – время, F_i – частота); $\mathbf{V}_{\text{ДФ}} = \{V_{\text{ДФ}_i},\ i = 1, \ldots, 4\}$ – множество лингвистических переменных, соответствующих дестабилизирующим факторам ($T_{\text{ОС}}$ – данные о температуре окружающей среды (**ОС**), ψ_i – сведения о шероховатости ИМ, RT_i – контактное сопротивление в системе «Измерительный зонд – ИМ», W_i – влажность); $\mathbf{U} = \{U_i, i = 1, \ldots, 3\}$ – множество выходных параметров теплофизических свойств ИМ (λ – коэффициент теплопроводности, α – коэффициент температуропроводности, c – теплоемкость); $\mathbf{V}_{\text{М}} = \{V_{\text{М}_i}, i = 1, \ldots, k\}$ – множество методов неразрушающего контроля ТФС материалов; $\mathbf{V}_{\text{пр}} = \{V_{\text{пр}_i}, i = 1, \ldots, r\}$ – множество методов принятий решений.

Математическая модель интеллектуальной системы применяется при выборе оптимальной архитектуры создаваемой ИИИС при учете перспективы расширения класса по теплопроводности теплоизоляционных строительных материалов при определении их теплофизических свойств в дистанционном режиме.

Математическая модель процесса теплофизических измерений

Предложена математическая модель процесса теплофизических измерений с использованием ИИИС ТФС теплоизоляционных материалов. При формализованном математическом описании ИИИС измерительный канал системы представлен входящими в его состав подсистемами: первичных измерительных преобразователей (**СИП**), нормирующих усилителей (**НУ**), аналого-цифровых преобразователей (**АЦП**), с соответствующими значениями входных сигналов, параметров, воздействующих дестабилизирующих факторов, выходных сигналов каждой подсистемы.

Математическая модель процессов измерений в интеллектуальной информационно-измерительной системе ТФС материалов представлена системой зависимостей

$$\begin{cases} U_{\text{СИП}}(Tt) = f_1(T_1, T_2, ..., T_n;\ P_{\text{ДФ}1}, P_{\text{ДФ}2}, ..., P_{\text{ДФ}i};\ B_1, B_2, ..., B_{mi}, t); \\ U_{\text{НУ}}(T) = f_2(U_{\text{СИП}1}, U_{\text{СИП}2}, ..., U_{\text{СИП}j};\ P_{\text{ДФ}1}, P_{\text{ДФ}2}, ..., P_{\text{ДФ}N}; B_1, B_2, ..., B_b, t); \\ K_{\text{АЦП}}(T) = f_3(U_{\text{НУ}1}, U_{\text{НУ}2}, ..., U_{\text{НУ}k};\ P_{\text{ДФ}1}, P_{\text{ДФ}2}, ..., P_{\text{ДФ}d};\ B_1, B_2, ..., B_c, t); \\ E_{\text{ТФС}}(T_n) = f_4(T_{\text{k}1}, T_{\text{k}2}, ..., T_{\text{k}n};\ \Pi_1, \Pi_2, ..., \Pi_{\text{a}};\ B_1, B_2, ..., B_T, t), \end{cases}$$

где $U_{\text{СИП}}$ – сумма выходных напряжений системы измерительных преобразователей; $T_1, T_2, ..., T_n$ – значение температуры рабочего спая термопары; $P_{\text{ДФ}1}, P_{\text{ДФ}2}, ..., P_{\text{ДФ}i}$ – вид воздействующих дестабилизирующих факторов на систему измерительных преобразователей – температуры среды, шероховатости исследуемых поверхностей объектов, влажности, контактного сопротивления; $B_1, B_2, ..., B_{mi}$ – параметры термодатчика (чувствительность, линейность характеристики, класс точности, предел возможных изменений температуры); t – время; $U_{\text{НУ}}$ – напряжение с выхода нормирующего усилителя; $U_{\text{СИП}1}, U_{\text{СИП}2}, ..., U_{\text{СИП}j}$ – выходные значения сигналов с СИП, поступающие на вход усилителя; $P_{\text{ДФ}1}, P_{\text{ДФ}2}, ..., P_{\text{ДФ}N}$ – воздействующие ДФ на нормирующие усилители (изменение температуры среды, напряжений питания, сопротивлений нагрузки); $B_1, B_2, ..., B_b$ – значения параметров нормирующих усилителей (коэффициентов усилений, входного и выходного сопротивлений); $K_{\text{АЦП}}$ – выходной код, пропорциональный сигналу, поступающему на аналого-цифровой преобразователь (**АЦП**) с нормирующего усилителя: $U_{\text{НУ}1}, U_{\text{НУ}2}, ..., U_{\text{НУ}k}$; $P_{\text{ДФ}1}, P_{\text{ДФ}2}, ..., P_{\text{ДФ}d}$ – воздействующие ДФ на АЦП (различные виды помех и шумов); $B_1, B_2, ..., B_c$ – виды статических и динамических параметров АЦП; $E_{\text{ТФС}}$ – значения параметров ТФС теплоизоляционных материалов (коэффициентов тепло- и температуропроводности, теплоемкости); $T_{\text{k}1}, T_{\text{k}2}, ..., T_{\text{k}n}$ – температура в контролируемой точке ТМ интеллектуальным зондом; $\Pi_1, \Pi_2, ..., \Pi_{\text{a}}$ – погрешности аппроксимации функциональной зависимости коэффициентов тепло- и температуропроводности от температуры в контролируемых точках ТМ; $B_1, B_2, ..., B_T$ – величины констант, определяемых в процессе градуировки ИИИС.

В интеллектуальной информационно-измерительной системе применяется метод определения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов частотно-импульсного теплового воздействия линейным нагревателем интеллектуального измерительного зонда на поверхность исследуемого материала и реги-

страции температурно-временной зависимости $T(x,\tau)$ в контактной области зонда и исследуемого объекта в заданные моменты контроля T_n и T_m. Температура в результате формирования *n*-го импульса рассчитывается следующим образом [7]

$$T(x,n)=\frac{QF}{4\pi\lambda}\sum_{i=1}^{n-1}\frac{1}{i}\exp\left(-\frac{x^2}{4\alpha\Delta\tau i}\right), \quad (1)$$

где Q – мощность источника тепла; F – частота тепловых импульсов; x – расстояние между линейным источником тепла и контролируемой точкой; τ – время.

Полученная измерительная информация записывается в базу данных ИИИС и применяется при расчете комплекса теплофизических свойств теплоизоляционных материалов.

Используя измеренные значения температур $T(x,n)$ и $T(x,m)$, на основе формулы (1) получены формулы для определения параметров ТФС материалов (коэффициенты тепло- и температуропроводности):

$$\alpha = B_1\exp\left(B_2\frac{T_n}{T_m}\right);\quad \lambda=\frac{1}{T_m}B_3\ln(B_4\alpha). \quad (2)$$

Аналоговая измерительная информация температур T_n и T_m преобразуется в цифровой код, используя математическую модель АЦП [7] и формулу (2) для расчета параметров ТФС теплоизоляционных материалов, следующим образом:

$$K_{\text{ИК}}(T_n)=\frac{\left[\left(U_{\text{СИП}}(T_n)+\Delta U_{\text{СИП}}(T_n)\right)\text{K}_{\text{ДУ}}+\Delta U_{\text{ДУ ДФ}}(T_n)\right]}{3\cdot10^{-5}}+0{,}062;$$

$$K_{\text{ИК}}(T_m)=\frac{\left[\left(U_{\text{СИП}}(T_m)+\Delta U_{\text{СИП}}(T_m)\right)\text{K}_{\text{ДУ}}+\Delta U_{\text{ДУ ДФ}}(T_m)\right]}{3\cdot10^{-5}}+0{,}062;$$

$$\alpha = B_1\exp\left(B_2\frac{K_{\text{ИК}}(T_n)}{K_{\text{ИК}}(T_m)}\right)=$$

$$=B_1\exp\left(B_2\frac{\dfrac{\left[\left(U_{\text{СИП}}(T_n)+\Delta U_{\text{СИП}}(T_n)\right)\text{K}_{\text{ДУ}}+\Delta U_{\text{ДУ ДФ}}(T_n)\right]}{3\cdot10^{-5}}+0{,}062}{\dfrac{\left[\left(U_{\text{СИП}}(T_m)+\Delta U_{\text{СИП}}(T_m)\right)\text{K}_{\text{ДУ}}+\Delta U_{\text{ДУ ДФ}}(T_m)\right]}{3\cdot10^{-5}}+0{,}062}\right);$$

$$\alpha = B_1\exp\left(B_2\frac{\left[\left(U_{\text{СИП}}(T_n)+\Delta U_{\text{СИП}}(T_n)\right)\text{K}_{\text{ДУ}}+\Delta U_{\text{ДУ ДФ}}(T_n)\right]+1{,}86\cdot10^{-6}}{\left[\left(U_{\text{СИП}}(T_m)+\Delta U_{\text{СИП}}(T_m)\right)\text{K}_{\text{ДУ}}+\Delta U_{\text{ДУ ДФ}}(T_m)\right]+1{,}86\cdot10^{-6}}\right);$$

$$\lambda=\frac{1}{K_{\text{ИК}}(T_m)}B_3\ln(B_4\alpha)=$$

$$=\frac{1}{\dfrac{\left[\left(U_{\text{СИП}}(T_m)+\Delta U_{\text{СИП}}(T_m)\right)\text{K}_{\text{ДУ}}+\Delta U_{\text{ДУ ДФ}}(T_m)\right]}{3\cdot10^{-5}}+0{,}062}B_3\ln(B_4\alpha);$$

$$\lambda = \frac{3\cdot 10^{-5}}{\left[\left(U_{\text{СИП}}(T_m) + \Delta U_{\text{СИП}}(T_m)\right)\text{К}_{\text{ДУ}} + \Delta U_{\text{ДУ ДФ}}(T_m)\right] + 1{,}86\cdot 10^{-6}} B_3 \ln(B_4\alpha).$$

Математическая модель допускового контроля параметров теплофизических свойств теплоизоляционных строительных материалов

Модель применяется в ИИИС для оценки соответствия контролируемых параметров ТФС исследуемых материалов допустимым значениям.

На производстве осуществляется допусковый контроль выпускаемых теплоизоляционных материалов – минеральных ват, пенополиуретанов, матов из стекловолокна, рубероида, пенобетонов и др. Контроль теплопроводности в низком диапазоне теплопроводности ТМ является сложным и требует аналитического описания исследуемого объекта (**ИО**), чтобы обеспечить необходимую точность дистанционного контроля ИИИС параметров ТФС ТМ.

Качество изготавливаемых материалов на производстве согласно требованиям нормирующих документов [8] определяется точностью технологических процессов их производства, а также контролем теплопроводности выпускаемой продукции. Обеспечение точности технологического процесса достигается при соответствии заданному допуску его режимных параметров.

Разработана математическая модель допускового контроля режимных параметров технологического процесса изготовления материалов и теплопроводности теплоизоляционных строительных материалов на основе исследования теплофизических свойств различных видов материалов, обоснования требуемой точности дистанционного контроля с использованием ИИИС, анализа дестабилизирующих факторов, влияющих на технологический процесс, предполагаемой архитектуры ИИИС, установления достоверности измерительной информации.

Постановка задачи: измерить теплопроводность теплоизоляционных строительных материалов (**СМ**) $\lambda_{\text{СМ}}$ с требуемой относительной погрешностью δ_λ, при заданном метрологическом уровне ИИИС $\delta_{\text{ИИИС}}$, контролируя дистанционно режимные параметры технологического процесса производства теплоизоляционных материалов $Q_{\text{РП}}$, дестабилизирующие факторы $Q_{\text{ДФ}}$ и определяя их соответствие допустимым значениям в заданные интервалы времени τ.

Математическую модель допускового контроля теплопроводности $\lambda_{\text{СМ}}$ строительных материалов можно представить в общем виде

$$\lambda_{\text{СМ}} = f\left(Q_{\text{РП}}, Q_{\text{ДФ}}, \delta_\lambda, \delta_{\text{ИИИС}}, \tau\right). \quad (3)$$

Математическая модель допускового контроля теплопроводности материалов приведена в виде совокупности аналитических зависимостей параметров модели (3):

$$\lambda = f(Q_{\text{РП}}), \quad \lambda = f\left(Q_{\text{ДФ}}\right), \quad \lambda = f(\delta_{\text{ИИИС}}). \quad (4)$$

Аналитическая зависимость $\lambda = f\left(Q_{\text{РП}}\right)$ параметров математической модели (4) включает следующие компоненты:

$$\lambda = f(Q_{\text{РП}}) = f\left(C_{\text{ИС}}, C_{\text{МД}}, Q_{\text{СК}}\right), \quad (5)$$

где $C_{\text{ИС}}$ – концентрация исходного сырья; $C_{\text{МД}}$ – концентрация модифицирующих добавок; $Q_{\text{СК}}$ – связующие компоненты.

Получены аппроксимирующие зависимости компонентов выражения (5):

$$\lambda^* = f(C_{\text{ИС}}) = 2{,}21 \cdot 10^{-4} C_{\text{ИС}} + 1{,}41 \cdot 10^{-2};$$

$$\lambda^* = f(C_{\text{МД}}) = 2{,}52 \cdot 10^{-4} C_{\text{МД}} + 1{,}21 \cdot 10^{-2};$$

$$\lambda^* = f(Q_{\text{СК}}) = 2{,}13 \cdot 10^{-4} Q_{\text{СК}} + 2{,}73 \cdot 10^{-2}.$$

Аналитическая зависимость $\lambda = f(Q_{\text{ДФ}})$ параметров математической модели (4) включает следующие компоненты:

$$\lambda = f(Q_{\text{ДФ}}) = f(T_{\text{ОС}}, W_{\text{ОС}}), \quad (6)$$

где $T_{\text{ОС}}$, $W_{\text{ОС}}$ – температура и влажность окружающей среды соответственно.

Получены аппроксимирующие зависимости компонентов выражения (6):

$$\lambda^* = f(T_{\text{ОС}}) = 6{,}14 \cdot 10^{-4} T_{\text{ОС}} + 2{,}71 \cdot 10^{-2};$$

$$\lambda^* = f(W_{\text{ОС}}) = 2{,}23 \cdot 10^{-4} W_{\text{ОС}} + 2{,}79 \cdot 10^{-2}.$$

Получена аппроксимирующая зависимость $\lambda = f(\delta_{\text{ИИИС}})$ математической модели (4)

$$\lambda^* = f(\delta_{\text{ИИИС}}) = 0{,}412\delta_{\text{ИИИС}} + 0{,}572,$$

где $\delta_{\text{ИИИС}}$ – относительная погрешность измерения λ с помощью ИИИС.

Область существования математической модели (3) определяется следующими ограничениями:

$$Q_{\text{РП}} \in Q_{\text{РП}_{\text{доп}}}; \quad \delta_{\text{ИИИС}} \in \delta_{\text{ИИИС}_{\text{доп}}};$$

$$Q_{\text{ДФ}} \in Q_{\text{ДФ}_{\text{доп}}}; \quad \delta_{\lambda} \in \delta_{\lambda_{\text{доп}}},$$

где $Q_{\text{РП}_{\text{доп}}}$, $Q_{\text{ДФ}_{\text{доп}}}$, $\delta_{\lambda_{\text{доп}}}$, $\delta_{\text{ИИИС}_{\text{доп}}}$ – области допустимых значений контролируемых параметров при допусковом контроле теплопроводности строительных материалов с использованием ИИИС.

Математическая модель допускового контроля теплопроводности строительных материалов применяется в информационном виде в базе знаний разработанной ИИИС [9] дистанционного контроля ТМ при определении комплекса ТФС теплоизоляционных материалов с требуемой погрешностью не более 5 %.

Структура ИИИС ДК ТФС теплоизоляционных материалов

На рисунке 1 представлена структурная схема ИИИС ДК ТФС материалов. Контроль параметров ТФС материалов выполняется непосредственно в производственном цехе предприятия по изготовлению различных видов теплоизоляционных строительных материалов, на выходе технологической линии, куда поступает уже готовая продукция. Выпускаемые минеральные ваты – гераклит, изовент, изоруф, изофас и другие, отличаются незначительно по величине теплопроводности: в пределах 0,03…0,06 Вт/мК. Поэтому для точного контроля параметров ТФС минеральных ват в блоке принятия решений ИИИС реализуется процедура выбора оптимальных (рациональных) значений мощности теплового воздействия на исследуемые объекты и оптимальные временные промежутки между проводи-

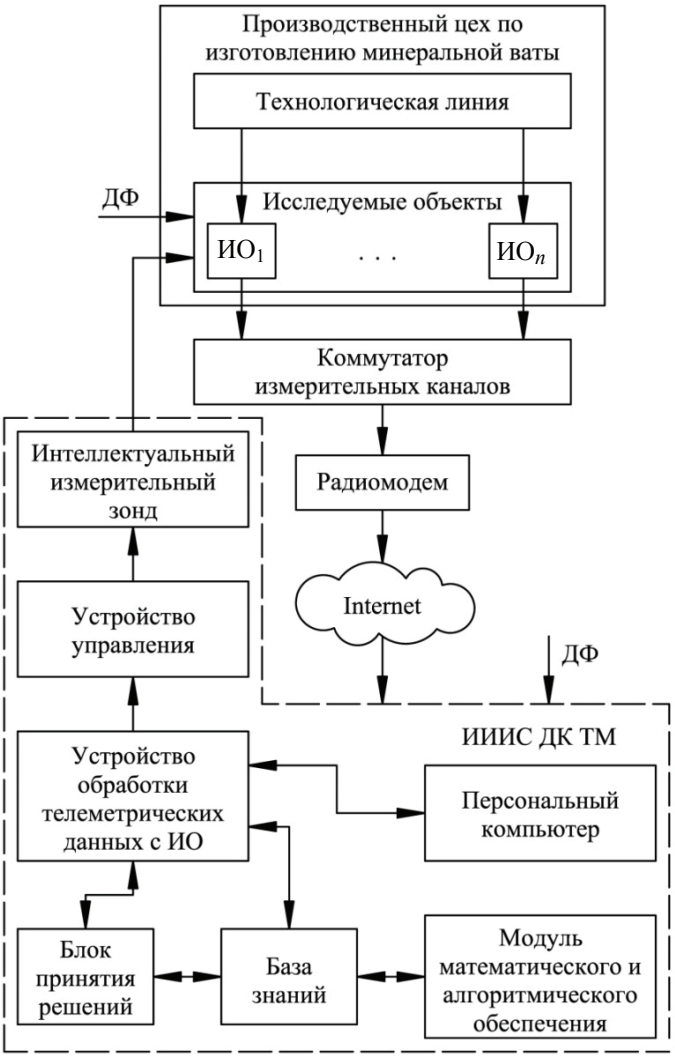


Рис. 1. Структурная схема интеллектуальной информационно-измерительной системы дистанционного контроля теплоизоляционных материалов

мыми теплофизическими измерениями на основе созданных продукционных правил, записанных в базу знаний системы. Заданные оптимальные режимные параметры в устройстве обработки телеметрических данных с исследуемого объекта, выполненном на базе микроконтроллера, с помощью устройства управления передаются в интеллектуальный измерительный зонд (**ИИЗ**) при проведении теплофизических измерений с помощью метода линейного мгновенного источника тепла. Интеллектуальный измерительный зонд реализует интеллектуальные процедуры, выбирая оптимальные режимные параметры при проведении теплофизическогоэксперимента по измерительным данным предварительно снятой тестовой термограммы. Полученная измерительная информация с исследуемых теплоизоля-ционных материалов через коммутатор каналов и радиомодем в виде радиосигнала поступает в ИИИС, где осуществляется обработка измерительных данных и расчет параметров ТФС теплоизоляционных материалов – коэффициентов тепло- и температуропроводности, теплоемкости.

Если рассчитанные значения параметров ТФС материалов отличаются от допустимых значений, указанных в нормативных документах на изготовление теплоизоляционных материалов, то данная информация поступает в технологический отдел предприятия для принятия решения по коррекции технологического процесса изготовления теплоизоляционных материалов для повышения их качества. Анализ, статистическая обработка измерительной информации об исследуемых объектах и ее хранение выполняются на персональном компьютере и применяются для дальнейшего совершенствования технологического процесса изготовления теплоизоляционных материалов.

В модуль алгоритмического обеспечения ИИИС программным способом записаны разработанные математические модели ИИИС ТФС материалов, процесса теплофизических измерений, допускового контроля ТФС теплоизоляционных материалов, алгоритмы работы ИИИС: идентификации измерительной информации, измерение параметров ТФС материалов, коррекции выходных параметров компонентов ИИИС на влияние ДФ. Базы данных и знаний содержат следующую информацию: параметры и характеристики исследуемых теплоизоляционных материалов, режимные параметры работы системы, а также аппроксимирующие функции, позволяющие выполнить коррекцию полученной измерительной информации в результате влияния воздействующих дестабилизирующих факторов на структурные компоненты измерительного канала ИИИС ДК ТФС материалов.

Обоснование точности информационно-измерительной системы дистанционного контроля теплофизических свойств теплоизоляционных строительных материалов

Для обоснования точности ИИИС ДК ТФС материалов рассмотрены характеристики погрешностей, полученные при обработке результатов измерений ТФС теплоизоляционных материалов с использованием теплового импульсного метода контроля. Анализ математической модели измерительных процессов в ИИИС позволил определить структуру суммарной относительной погрешности $\delta_{\Sigma} P_{\text{ТФС}}$ при ДК ТФС ТМ, которая формируется в результате преобразования измерительной информации T_i в структурных компонентах ИИС и использования аппроксимирующих зависимостей $\delta_{\text{ап}_{\text{ТФС}}}$ при расчете параметров λ, α, c с учетом дестабилизирующих факторов $\delta_{P_{\text{ДФ}}}$:

$$\delta_{\Sigma} P_{\text{ТФС}} = \delta_{\text{ИИЗ}} T_i + \delta_{\text{НУ}} T_i + \delta_{\text{АЦП}} K_{T_i} + \delta_{\text{ИП}} + \delta_{\text{ап}_{\text{ТФС}}} + \delta_{P_{\text{ДФ}}},$$

где $\delta_{\text{ИИЗ}} T_i$, $\delta_{\text{НУ}} T_i$, $\delta_{\text{АЦП}} K_{T_i}$, $\delta_{\text{ИП}}$ – погрешности измерения ИИЗ, НУ, АЦП (K_{T_i} – измерительный сигнал в двоичном коде) и источника питания соответственно.

Погрешности измерения в ИИИС T_i, коэффициентов α и λ определяются по формулам:

а) температуры

$$\delta T_i = \delta_{\text{ИИЗ}} T_i + \delta_{\text{НУ}} T_i + \delta_{\text{АЦП}} K_{T_i} + \delta_{\text{ИП}} + \delta_{\psi} T_i + \delta_{W} T_i + \delta_{\text{ДФ}} T_i + \delta_{R} T_i,$$

где $\delta_{\psi} T_i$, $\delta_{W} T_i$, $\delta_{\text{ДФ}} T_i$, $\delta_{R} T_i$ – погрешности из-за шероховатости поверхности ТМ, в результате изменения влажности, от влияния ДФ, из-за наличия контактных сопротивлений R соответственно.

б) коэффициента температуропроводности

$$\delta\alpha_i = \delta_{K1}\alpha_i + \delta_{K2}\alpha_i + \delta T_n\alpha_i + \delta T_m\alpha_i,$$

где δ_{K1}, δ_{K2} – погрешности расчета калибровочных коэффициентов К1 и К2; δT_n, δT_m – погрешности определения температур T_n и T_m в точках контроля n и m.

в) коэффициента теплопроводности

$$\delta\lambda_i = \delta_{K3}\lambda_i + \delta_{K4}\lambda_i + \delta_{\alpha}\lambda_i + \delta T_m\lambda_i,$$

где δ_{K3}, δ_{K4}, δ_{α} – погрешности расчета калибровочных коэффициентов К3, К4 и определения температуропроводности α соответственно.

Установлена аналитическая зависимость каждого компонента приведенной структуры суммарной относительной погрешности при дистанционном контроле теплофизических свойств теплоизоляционных материалов от ДФ. Так, аппроксимирующая зависимость напряжения с выхода ИЗ от температуры окружающей среды T_{OC} при измерении $P_{ТФС}$ ТМ имеет вид

$$\widetilde{U}_{ИЗ} = f(T_{OC}) = 0{,}0025(T_{OC})^2 - 0{,}1164(T_{OC}) + 1{,}979.$$

Обоснование точности ИИИС ДК параметров ТФС ТМ подтверждено экспериментальными исследованиями системы.

Проведены экспериментальные исследования предложенной ИИИС дистанционного контроля ТФС теплоизоляционных материалов (см. рис. 1), по результатам которых рассчитана относительная погрешность результатов измерения коэффициентов тепло- и температуропроводности исследуемых материалов (табл. 1).

Организация измерительного эксперимента заключается в подготовке, проведении измерений и обработке полученных результатов измерений. При подготовке к измерениям ставится задача обеспечения заданной точности измерения. Для этого создаются условия для измерений: учитывается априорная информация (температура и влажность окружающей среды, плотность материала, шероховатость поверхности исследуемого материала). Проводится предварительное измерение на образцовой мере (полимермодифицированном материале). Если погрешность измерения теплопроводности образцовой меры с использованием ИИС соответствует норме (3 %) при данных условиях измерения, то далее проводятся измерения на других исследуемых материалах.

Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований ИИИС ДК ТФС исследуемых объектов

Исследуемый объект	Данные λ, Вт/(мК)		Погрешность измерений δ_{λ}, %
	справочник	измеренные	
Пенополиуретан	0,029	0,030	3,45
Минеральная вата	0,040	0,0415	3,75
Маты из стекловолокна	0,050	0,052	4,00
Рубероид	0,170	0,178	4,70
Пенобетон	0,210	0,220	4,76

Эксперименты организованы в научно-исследовательской лаборатории «Проектирование интеллектуальных информационно-измерительных систем» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет». Проведены экспериментальные исследования ИИИС ДК ТФС исследуемых объектов – теплоизоляционных строительных материалов, результаты которых представлены в табл. 1. Анализируя данные, расчетно-экспериментальным методом установили, что относительная погрешность измерения составляет не более 5 %.

Заключение

Разработана методика построения математической модели интеллектуальной информационно-измерительной системы дистанционного контроля ТФС материалов, которая учитывает цели создания системы, оценку функционирования ИИИС, достоверность концепции формирования модели, влияющие дестабилизирующие факторы, проведение оценки достоверности модели.

Создана математическая модель ИИИС ДК теплофизических свойств теплоизоляционных материалов, отличающаяся включением в состав модели концептуальных компонентов, которые являются основными при создании архитектуры ИИИС дистанционного контроля ТФС материалов.

Предложена математическая модель процессов измерений в ИИИС ДК ТФС материалов, отличающаяся применением функциональной зависимости определяемых параметров теплофизических свойств теплоизоляционных материалов от влияющих дестабилизирующих факторов и учетом ограничений на погрешности определения коэффициентов тепло- и температуропроводности, теплоемкости для коррекции результатов измерения при дистанционном контроле.

Разработана математическая модель допускового контроля, отличающаяся наличием совокупности аналитических зависимостей определяемых параметров ТФС теплоизоляционных материалов от точности режимных параметров, дестабилизирующих факторов, относительной погрешности результатов измерения комплекса ТФС материалов.

Предложена ИИИС ДК теплоизоляционных материалов, отличающаяся применением интеллектуального измерительного зонда, устройством обработки телеметрических данных с исследуемых объектов, модулем математического и алгоритмического обеспечения и созданной базой знаний. В базе знаний в формализованном виде представлены математические модели ИИИС, процесса измерений и допускового контроля, применяемые как в процессе проектирования, так и при реализации алгоритма функционирования ИИИС ТФС дистанционного контроля теплоизоляционных материалов.

Получение оперативной и точной информации о ТФС изготавливаемых теплоизоляционных материалов в режиме реального времени способствует повышению качества и снижению процента брака выпускаемых теплоизоляционных материалов.

Выполнено обоснование точности ИИИС ДК ТМ и определена структура суммарной относительной погрешности при дистанционном контроле ТФС теплоизоляционных материалов. Проведены экспериментальные исследования разработанной ИИИС и выполнен метрологический анализ результатов измерений, на основе которых установлено, что относительные погрешности при определении параметров ТФС исследуемых материалов составляют не более 5 %.

Предложенная интеллектуальная информационно-измерительная система с разработанным математическим и информационным обеспечением рекомендуется для дистанционного контроля комплекса теплофизических свойств при производстве теплоизоляционных материалов.

Список литературы

1. Laghi, L. Uncertainty Analysis of Thermal Conductivity Measurements in Materials for Energy-Efficient Buildings / L. Laghi, F. Pennecchi, G. Raiteri // International Journal of Metrology and Quality Engineering. – 2011. – Vol. 2, No. 2. – P. 141 – 151.
2. Селиванова, З. М. Проектирование интеллектуальных информационно-измерительных систем неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / З. М. Селиванова, А. А. Самохвалов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2010. – Т. 16, № 2. – С. 273 – 282.
3. Hofman, D. Intellectual Measurements for Obtaining Objective Information in Science and Technology / D. Hofman, K. Karaya // Proceedings of the 10th World Congress of IMEKO. – Prague, 1985. – P. 19 – 34.
4. Раннев, Г. Г. Интеллектуальные средства измерений / Г. Г. Раннев. – М. : Издательский центр «Академия», 2011. – 272 с.
5. Стасенко, К. С. Интеллектуальная информационно-измерительная система мониторинга режимных параметров технологического процесса производства минеральных ват / К. С. Стасенко, З. М. Селиванова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2013. – Т. 19, № 1. – С. 52 – 60.
6. The Development of the Data Transfer Protocol in the Intelligent Control Systems of the Energy Carrier Parameters / I. S. Karavaev, V. I. Selivantsev, Yu. I. Shtern, M. Yu. Shtern // Conference Venue at the National Research University of Electronic Technology "MIET", Proceedings of the IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2018, 29 – 31 January, 2018, Moscow. – M., 2018. – P. 1305 – 1309.
7. Селиванова, З. М. Математические модели и алгоритм для совершенствования информационно-измерительной системы неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / З. М. Селиванова, Т. А. Хоан // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 4. – С. 520 – 534. doi: 10.17277/vestnik.2016.04.pp.520-534
8. Свод правил СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий // Минрегион России. – Введ. 2013-07-01. – М. : ООО «Аналитик», 2012. – 95 с.
9. Selivanova, Z. M. Simulation of Intelligent Information-Measuring Systems of Thermophysical Properties of Materials and Products / Z. M. Selivanova, D. S. Kurenkov, T. A. Hoang // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1278. – 7 p.

Intelligent Information-Measuring System for Remote Control of the Thermophysical Properties of Insulating Materials under the Influence of Destabilizing Factors

Z. M. Selivanova, D. S. Kurenkov

Department of Design of Electronic and Microprocessor Systems, selivanova@mail.jesby.tstu.ru; TSTU, Tambov, Russia

Keywords: destabilizing factors; remote control mode; tolerance control; complex of thermophysical properties; heat-insulating building materials.

Abstract: A technique is proposed for developing a mathematical model of an intelligent information-measuring system (IIMS) and its structure, designed for operational and accurate non-destructive testing of thermophysical properties (TPPs) of energy-efficient heat-insulating materials (HIMs) in the remote control mode.

The mathematical model of measurement processes in an intelligent system for remote monitoring of the TPP complex of the studied materials is presented in the form of a functional dependence of the output signals of the structural components of the measuring channel of the information-measuring system on the impact of the input signals, taking into account the parameters and characteristics of the system components that affect destabilizing factors. A mathematical model of tolerance control of TPPs of HIMs has been created, which is used at the IIMS remote monitoring to ensure the quality of the materials produced in the production.

References

1. Laghi L., Pennecchi F., Raiteri G. Uncertainty Analysis of Thermal Conductivity Measurements in Materials for Energy-Efficient Buildings, *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 2011, vol. 2, no. 2, pp. 141-151.
2. Selivanova Z.M., Samokhvalov A.A. [Design of intelligent information-measuring systems of non-destructive testing of the thermophysical properties of materials], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2010, vol. 16, no. 2, pp. 273-282. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Hofman D., Karaya K. Intellectual measurements for obtaining objective information in science and technology, *Proceedings of the 10th World Congress of IMEKO*, Prague, 1985, pp. 19-34.
4. Rannev G.G. *Intellektual'nyye sredstva izmereniy* [Intelligent measuring instruments], Moscow: Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2011, 272 p. (In Russ.)
5. Stasenko K.S., Selivanova Z.M. [Intelligent Information-measuring System for Monitoring the Regime Parameters of the Technological Process for the Production of Mineral Wool Slabs], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2013, vol. 19, no. 1, pp. 52-60. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Karavaev I.S., Selivantsev V.I., Shtern Yu.I., Shtern M.Yu. The Development of the Data Transfer Protocol in the Intelligent Control Systems of the Energy Carrier Parameters, *Conference venue at the National Research University of Electronic Technology "MIET", Proceedings of the IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2018*, 29-31 January, 2018, Moscow, 2018, pp. 1305-1309. (In Eng.)
7. Selivanova Z.M., Khoan T.A. [Mathematical Models and Algorithm for Improving the Information-measuring System for Nondestructive Testing of Thermal-Physical Properties of Materials], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 4, pp. 520-534, doi: 10.17277/vestnik.2016.04.pp.520-534 (In Russ., abstract in Eng.)
8. *Svod pravil SP 50.13330.2012 Teplovaya zashchita zdaniy* [Code of rules SP 50.13330.2012 Thermal protection of buildings], Moscow: OOO «Analitik», 2012, 95 p. (In Russ.)
9. Selivanova Z.M., Kurenkov D.S., Hoang T.A. Simulation of Intelligent Information-Measuring Systems of Thermophysical Properties of Materials and Products, *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1278, 7 p.

Intelligentes Messinformationen-Fernbedienungssystem für thermophysikalische Eigenschaften der Wärmedämmstoffe unter den Bedingungen der Einwirkung destabilisierender Faktoren

Zusammenfassung: Angeboten wird die Methodik der Entwicklung eines mathematischen Modells des intelligenten Informations-Messsystems (IMS) und seiner Struktur, das für schnelle und genaue zerstörungsfreie Prüfung der thermischen Eigenschaften (TFE) von energieeffizienten Dämmstoffen (DS) in der

Fernüberwachung bestimmt ist. Das mathematische Modell von Messprozessen in einem intelligenten System zur Fernüberwachung des TFE-Komplexes der untersuchten Materialien wird in Form einer funktionalen Abhängigkeit der Ausgangssignale der Strukturkomponenten des Messkanals des Informationsmesssystems vom Einfluss der Eingangssignale unter Berücksichtigung der Parameter und Eigenschaften der Systemkomponenten dargestellt, die destabilisierende Faktoren beeinflussen. Es ist ein mathematisches Modell zur Toleranzkontrolle von TFE der TM erstellt, das bei der IMS-Fernüberwachung verwendet wird, um die Qualität der in der Produktion hergestellten Materialien sicherzustellen.

Système intellectuel d'information et de mesure pour le contrôle à distance des propriétés thermiques et physiques des matériaux d'isolation thermique sous l'influence des facteurs de déstabilisation

Résumé: Est proposée une méthodologie de l'élaboration d'un modèle mathématique d'un système intellectuel d'information et de mesure (SIIM) et de sa structure conçue pour le transfert rapide et précis du contrôle non destructif des propriétés thermiques et physiques (PTP) des matériaux d'isolation thermique (MIT) en mode de contrôle à distance. Le modèle mathématique des processus de mesure dans un système intelectuel du contrôle à distance du complexe des PTP des matériaux étudiés est présenté sous la forme de la dépendance fonctionnelle des signaux de sortie de l'action des signaux d'entrée en tenant compte des paramètres du système mathématique et des caractéristiques des composants, des facteurs de déstabilisation qui ont de l'influence. Est créé le modèle mathématique du contrôle à distance des PTP de SIIM pour assurer la qualité des matériaux produits.

Авторы: ***Селиванова Зоя Михайловна*** – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; ***Куренков Дмитрий Сергеевич*** – магистрант, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: ***Муромцев Дмитрий Юрьевич*** – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», проректор по научно-инновационной деятельности, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

УДК 621.315.592
DOI: 10.17277/vestnik.2020.01.pp.020-025

ПЕРВИЧНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ БЕСКОНТАКТНОГО КОНТРОЛЯ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А. Д. Лоскутова[1], А. П. Королев[2], В. Н. Чернышов[1]

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

Ключевые слова: диффузия; инфракрасное излучение; первичный измерительный преобразователь; полевая структура; термическое окисление кремния.

Аннотация: Полупроводниковая полевая структура для контроля инфракрасного излучения, представляющая первичный измерительный преобразователь, не подвергается традиционной технологии изготовления как типовые полупроводниковые приборы, такие как диоды, транзисторы, резисторы и др. Поэтому для полупроводникового преобразователя необходимо разработать индивидуальную технологию как для несерийного изделия. Дано описание основных операций технологического процесса производства полупроводникового первичного измерительного преобразователя для прибора контроля инфракрасного излучения.

При измерении и контроле инфракрасного излучения преобразователями на основе монокристаллических полупроводников выходная характеристика связана с термогенерацией основных носителей заряда в полупроводниковом терморезисторе. Термогенерация зависит от температуры, обусловленной инфракрасными лучами. Под затвором и диэлектриком в квантовой яме образуется заряд в виде электронов [1]. С увеличением концентрации электронов растет выходной ток преобразователя инфракрасного излучения в электрический сигнал [2].

Для контроля инфракрасного излучения спроектирован полупроводниковый первичный измерительный преобразователь (**ПИП**), который представляет собой полевую структуру [3]. Первичный измерительный преобразователь является резистором, управляемым изолированным металлическим электродом (рис. 1).

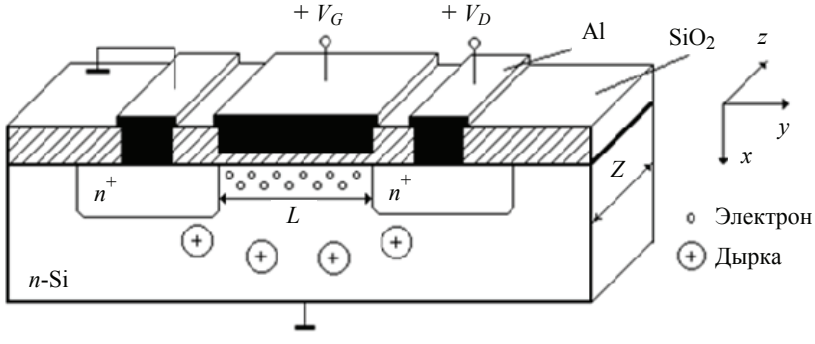


Рис. 1. Полупроводниковая полевая структура ПИП инфракрасного излучения

Потенциалом V_G на изолированном от кремниевой подложки алюминиевом электроде регулируется концентрация основных носителей заряда электронов и величина электропроводности в канале L. Величина V_D задает разность потенциалов на расстоянии L. Данные потенциалы влияют на выходную характеристику преобразователя при измерении величины инфракрасного излучения, что позволяет использовать ПИП для конкретных условий. На выходные электрофизические характеристики ПИП влияют и его структурно-топологические параметры: ширина Z (размер канала в направлении оси z) и длина канала L, толщина диэлектрика под изолированным алюминиевым электродом, концентрация примеси в подложке полевой структуры. Структурно-топологические величины определяются на этапе технологического проектирования ПИП. Технология изготовления преобразователя не является стандартным процессом получения полупроводниковых приборов, поэтому в статье представлена разработка операций формирования структуры полевого полупроводникового ПИП инфракрасного излучения. Основными разработанными и представленными в статье операциями технологии создания преобразователя являются диффузия повышенной концентрации n^+ донорной примеси в подконтактные области и выращивание тонкого диэлектрика под изолированным электродом с потенциалом V_G.

При формировании размеров подконтактных легированных карманов одновременно создаются длина L и ширина Z проводящего канала. Границы легированных областей должны совпадать с границами изолированного электрода, расположенного на тонком слое диэлектрика. Диффузия примеси, проходящая через окно оксида кремния, распространяется не только вертикально, но и в сторону под диэлектрик. Как известно из научной литературы боковая диффузия составляет 0,8 вертикальной диффузии. На рисунке 2 глубина перехода $x_{\text{пер}}$ – граница введенной вертикально примеси.

Для расчета глубины легирования воспользуемся выражением, описывающим распределение примеси по направлению x:

$$N(x,t) = N_{\text{пов}}\operatorname{erfc}\frac{x}{2\sqrt{Dt}}, \tag{1}$$

где $N(x, t)$ – концентрация примеси, зависящая от расстояния от поверхности и времени; $N_{\text{пов}}$ – концентрация примеси на поверхности; erfc – функция ошибок; D – коэффициент диффузии:

$$D = D_0 \mathrm{e}^{-\frac{E_\text{a}}{kT}},$$

где E_a – энергия активации; k – постоянная Больцмана; T – температура по шкале Кельвина; $D_0 = 8\,\text{см}^2/\text{с}$ – коэффициент, не зависящий от температуры.

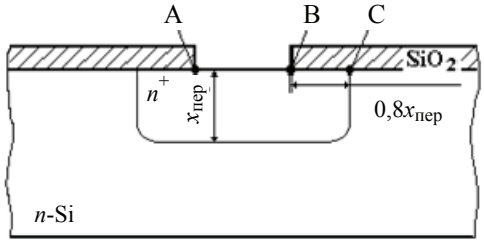


Рис. 2. Легированная область под контактом

Из формулы (1) находим требующуюся поверхностную концентрацию $N_{пов}$, с помощью которой можно получить глубину легирования x для известной концентрации в подконтактной области

$$N_{пов} = \frac{N}{\operatorname{erfc}\frac{x_{пер}}{2\sqrt{Dt}}}, \quad (2)$$

где t – время диффузии, мин.

Боковую глубину загонки введения $0{,}8x_{пер}$ можно определить оптическим способом, стравив оксид кремния SiO_2 (рис. 3).

При травлении оксида кремния травится и кремниевая подложка, открытая в окне диэлектрика. Как видно на рис. 3, расстояние BC и есть глубина легирования в сторону под диэлектрик. Легированная область будет отличаться цветом, поэтому это расстояние можно измерить с помощью микроскопа. Измерив расстояние BC, равное $0{,}8x_{пер}$, можно рассчитать $x_{пер}$. Измерив и рассчитав $x_{пер}$ и боковое подлегирование $0{,}8x_{пер}$, сопоставим их значения с рассчитанным для этого случая по формуле (2) значением поверхностной концентрации примеси при легировании. Эти навыки позволят проводить диффузию под контакты истока и стока, совмещая границы диффузионных областей с границами изолированного электрода затвора (рис. 4).

После легирования следует операция выращивания подзатворного диэлектрика при температуре 1473 К. При такой температуре идет разгонка введенной примеси. Поэтому легировать подконтактные области надо не до совмещения границ диффузионных областей с границами затвора. При выращивании тонкого подзатворного диэлектрика необходимо использовать столько времени, сколько требуется на разгонку примеси до совмещения границ. Распределение диффузанта при разгонке описывается выражением

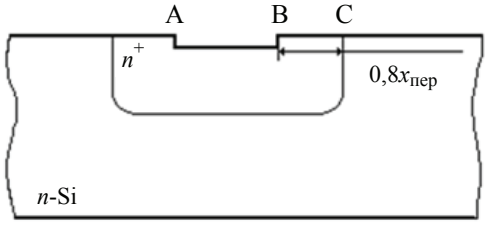


Рис. 3. Подложка с легированной областью после травления оксида кремния SiO_2

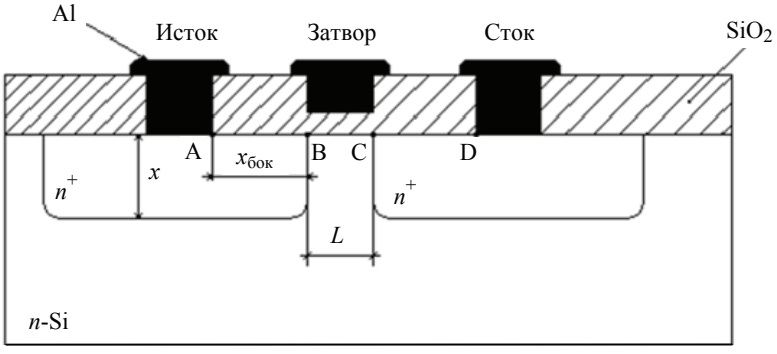


Рис. 4. Структура полевого ПИП инфракрасного излучения

$$N(x,t)=\frac{N_{\text{пов}}}{\sqrt{\pi D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)}}\exp\left(-\frac{x^2}{4tD_0\exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)}\right).$$

Окисление под затвором проводилось при температуре 1473 К в открытой кварцевой трубе. Для выявления технологических параметров выращивания подзатворного диэлектрика проведены эксперименты. Получены экспериментально толщины оксида кремния и определены по цвету окисленных образцов. Длина волны цвета кратна толщине оксида. Результат эксперимента изображен на рис. 5, где отображена зависимость толщины оксида кремния от времени окисления.

Используя экспериментальные данные можно получить математическое выражение, описывающее зависимость роста толщины оксида кремния от времени при заданной температуре (указанной выше) 1473 К. При исследовании окисления поверхности кремниевой подложки необходимо определить этапы роста оксида: 1) адсорбция атомов кислорода поверхностью оксида кремния; 2) диффузия кислорода к границе раздела Si – SiO_2; 3) химическая реакция кислорода с кремнием и образование слоя SiO_2; 4) диффузия к поверхности газообразных продуктов реакции H_2 и десорбция с окисленной поверхности. В процессе окисления протекают химические реакции:

$$\mathrm{Si}+\mathrm{O_2}\rightarrow\mathrm{SiO_2};$$

$$\mathrm{Si}+2\mathrm{H_2O}\rightarrow\mathrm{SiO_2}+2\mathrm{H_2}.$$

Скорость окисления определяется самой медленной стадией. Ей является диффузия кислорода через слой оксида кремния к границе раздела с кремниевой подложкой. Математическая формула имеет вид [4]

$$d^m = Kt, \tag{3}$$

где K – константа, определяемая давлением и температурой.

Если окисление проводится при давлении отличающемся не более чем на порядок, то $m = 2$ [4]. Необходимо определить математическую зависимость толщины оксида кремния от времени по экспериментальным данным. Упростим уравнение (3), обозначив d за y и K за a: $y = at$. Методом наименьших квадратов определили $a \approx 4{,}4\cdot10^{-4}\,\frac{\text{мкм}^2}{\text{мин}}$. Математическая зависимость (3) будет иметь вид

$$d^2 = 4{,}4\cdot10^{-4}t \text{ или } d = 0{,}021\sqrt{t}. \tag{4}$$

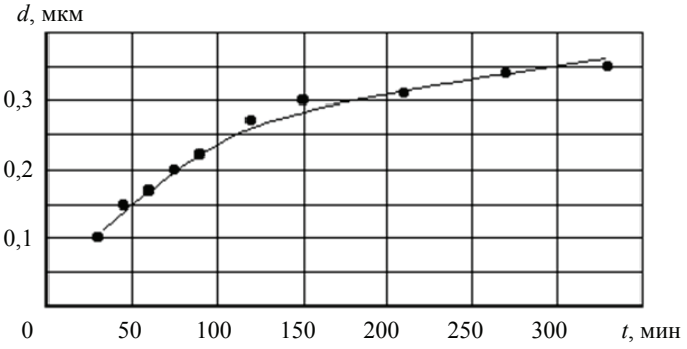


Рис. 5. Графики зависимости толщины окисленного слоя подложки от времени

На рисунке 5 изображены графики зависимости толщины окисленного при температуре 1473 К слоя подложки от времени. Нанесенные точки отражают полученные экспериментально значения, линия – результат расчета по полученной формуле (4). Из графиков видно, что экспериментальные и расчетные зависимости совпадают. Следовательно, полученная аналитическая зависимость (4) пригодна для расчета при заданной температуре 1473 К. Таким образом, исследованы и описаны принципы легирования подконтактных областей в подложке и технология выращивания подзатворного оксида кремния в полевой структуре.

Список литературы

1. Яцинин, Ю. В. Образование заряда в квантовой яме в полевой структуре / Ю. В. Яцинин, А. П. Королев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 17, № 2. – С. 525 – 528.

2. Брусенцов, Ю. А. Исследование электрофизических процессов в полевых полупроводниковых структурах для измерения теплофизических характеристик / Ю. А. Брусенцов, А. П. Королев, А. В. Озаренко // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2006. – Т. 12, № 1. – С. 122 – 128.

3. Лоскутова, А. Д. Цифровые преобразователи теплофизических характеристик в сельскохозяйственном производстве / А. Д. Лоскутова, И. Л. Королева // Материалы I Междунар. науч.-практ. конф. «Цифровизация агропромышленного комплекса», 10 – 12 октября 2018 г., Тамбов. – Тамбов, 2018. – С. 89 – 92.

4. Аваев, Н. А. Основы микроэлектроники : учеб. пособие / Н. А. Аваев, Ю. Е. Наумов, В. Т. Фролкин. – М. : Радио и связь, 1991. – 287 с.

Non-Contact Infrared Sensor Primary Transmitter

A. D. Loskutova[1], A. P. Korolev[2], V. N. Chernyshov[1]

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

Keywords: diffusion; infrared radiation; primary measuring transducer; field structure; thermal oxidation of silicon.

Abstract: The semiconductor field structure for monitoring infrared radiation, which represents the primary measuring transducer, is not subjected to the traditional manufacturing technology as typical semiconductor devices, such as diodes, transistors, resistors, etc. Therefore, for a semiconductor converter it is necessary to develop an individual technology as for non-serial products. A description of the basic operations of the manufacturing process of a semiconductor primary measuring transducer for an infrared radiation monitoring device is given.

References

1. Yatsinin Yu.V., Korolev A.P. [Charge formation in a quantum well in a field structure], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2011, vol. 17, no. 2, pp. 525-528. (In Russ., abstract in Eng.)

2. Brusentsov Yu.A., Korolev A.P., Ozarenko A.V. [Research of electrophysical processes in field semiconductor structures for measuring thermophysical

characteristics], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2006, vol. 12, no. 1, pp. 122-128. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Loskutova A.D., Koroleva I.L. *Materialy I Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Tsifrovizatsiya agropromyshlennogo kompleksa»* [Materials of the I International scientific-practical conference "Digitalization of the agro-industrial complex"], 10 - 12 October, 2018, Tambov, 2018, pp. 89-92. (In Russ., abstract in Eng.)

4. Avayev N.A., Naumov Yu.Ye., Frolkin V.T. *Osnovy mikroelektroniki: uchebnoye posobiye* [Fundamentals of microelectronics: a training manual], Moscow: Radio i svyaz', 1991, 287 p. (In Russ.)

Primärer Messwandler der berührungslosen Steuerung der Infrarotstrahlung

Zusammenfassung: Die Halbleiterfeldstruktur zur Überwachung der Infrarotstrahlung, die den primären Messwandler darstellt, unterliegt nicht der traditionellen Herstellungstechnologie wie typische Halbleiterbauelemente, solche wie Dioden, Transistoren, Widerstände u.a. Daher ist es für einen Halbleiterwandler erforderlich, eine individuelle Technologie wie für ein nicht serielles Erzeugnis zu entwickeln. Es ist die Beschreibung der grundlegenden Operationen des Herstellungsprozesses des Halbleiter-Primärmesswandlers für eine Infrarotstrahlungsüberwachungsvorrichtung gegeben.

Transducteur primaire de mesure du contrôle sans contact du rayonnement infrarouge

Résumé: La structure de champ semi-conducteur pour le contrôle du rayonnement infrarouge qui représente le transformateur primaire de mesure n'est pas soumise à la technologie de la fabrication traditionnelle en tant qu'instrument type de conducteur tel que diodes, transistors, résistances, etc. C'est pourquoi il nécessite une technologie individuelle de la construction. Est donnée la description des principales opérations du procédé de la fabrication du transducteur primaire de mesure à semi-conducteurs pour l'appaeil du contrôle du rayonnement infrarouge.

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

Рецензент: ***Пудовкин Анатолий Петрович*** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

УДК 536.2
DOI: 10.17277/vestnik.2020.01.pp.026-032

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ИМПУЛЬСНОГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ РАСТИТЕЛЬНЫХ ТКАНЕЙ ЯБЛОК

В. О. Буланова

Кафедра «Мехатроника и технологические измерения», kafedra@uks.tstu.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия

Ключевые слова: влажность; измерение; измерительная установка; конструкционный размер; коэффициент температуропроводности; обработка данных; растительные ткани; тепловой импульс.

Аннотация: Предложен способ измерения влажности растительных тканей яблок, основанный на зависимости теплопроводности и коэффициента температуропроводности материалов от их влажности. Разработана измерительная установка для определения указанных теплофизических величин методом линейного импульсного источника теплоты, применявшаяся в ходе измерений теплофизических характеристик растительных тканей яблок известной влажности. Полученные экспериментальные зависимости аппроксимированы полиномами, которые могут быть использованы для контроля содержания влаги в яблоках и экспрессной калибровки влагомеров, используемых при неразрушающих измерениях влажности и оценке степени увядания яблок.

Для агропромышленного комплекса страны в условиях рыночной экономики актуально решение проблемы повышения качества сельскохозяйственной продукции, эффективности ее производства и хранения. Для фруктов и овощей необходимыми условиями обеспечения качества собранного урожая на долгое время являются эффективная сортировка и поддержание заданных условий при хранении. Необходимым условием сохранности овощей и фруктов, и в частности яблок, является поддержание влажности растительных тканей на заданном уровне (за счет поддержания влажности воздуха в хранилищах на уровне 90 – 95 %), что предотвращает преждевременное увядание плодов. Не всегда пониженная влажность растительных тканей может быть обнаружена визуально или органолептическим методом (особенно на начальных стадиях), поэтому необходимы средства измерения, обеспечивающие возможность инструментального контроля данного показателя качества.

Определения влажности растительных тканей яблок возможно прямыми (как правило, весовыми) и косвенными (оптическими, теплофизическими, ультразвуковыми) методами измерения [1, 2]. Весовые методы требуют больше времени и ресурсов на контроль влажности растительных тканей яблок.

Теплофизические влагомеры отличаются простотой конструкции, а процесс измерения можно автоматизировать. При условии миниатюризации датчиков с их помощью можно определять не только интегральную влажность, но и локальные значения распределения влажности в объеме материала.

К недостаткам теплофизических влагомеров следует отнести сильное влияние плотности материала и необходимость термического контакта с чувствительным элементом. Наличие поверхностной влаги в зоне контакта может вызвать

большие погрешности. Для выполнения измерения необходим отбор пробы или введение датчика в яблоко, что делает контроль разрушающим.

Неразрушающий контроль позволяют обеспечить ультразвуковые влагомеры, основанные на зависимости характеристик ультразвуковых колебаний от свойств и состава среды (в том числе содержания влаги), в которой распространяется ультразвук. Приборы, принцип действия которых основан на поглощении ультразвука, имеют значительные дополнительные погрешности, связанные с изменением параметров генераторов, усилителей, излучателей и приемников ультразвука, а также различных параметров контролируемого объекта.

Решением данной проблемы может быть разработка измерительных комплексов с применением бесконтактных измерений на основе гиперспектральных камер, работающих в ближнем инфракрасном диапазоне, включающем длины волн, на которых наблюдаются максимумы поглощения энергии молекулами воды. Однако, как показали экспериментальные исследования, на спектрограмму растительных тканей яблок влияет не только содержание в них воды, но и сорт плода, место его произрастания, степень зрелости и ряд других характеристик. Поэтому для контроля точности измерений и экспрессной калибровки гиперспектральных камер необходим альтернативный и недорогой способ измерения влажности растительных тканей, как например, теплофизический метод измерения влажности, рассмотренный в работах [3 – 7, 9 – 13].

Теплофизические характеристики растительных тканей яблок исследованы с применением метода линейного импульсного источника теплоты. Проведенные эксперименты помогли выявить зависимость значений теплопроводности и коэффициента температуропроводности от влажности растительных тканей яблок.

Физическая модель измерительного устройства представляет собой два полуограниченных (в тепловом смысле) тела из исследуемого материала [4, 8 – 11]. Между верхним и нижним телами помещают линейный электронагреватель длиной L (выполненный в виде тонкой металлической проволоки из константана), а на расстоянии r от нагревателя в этой же плоскости размещают измеритель температуры (термоэлектрический преобразователь). Схемы и конструкции аналогичных измерительных устройств рассмотрены в работах [3 – 5, 7, 11, 12].

На основе теоретического обоснования метода линейного импульсного источника теплоты, а также рекомендаций, представленных в [9 – 12], следует, что в исследуемом материале (на расстоянии r от линейного нагревателя, в единице длины которого в течение промежутка времени $0 < \tau < \tau_и$ выделилось количество теплоты $Q_л = q_л\tau_и$) изменение температуры $T(r, \tau)$ может быть вычислено по формуле:

$$\left[T(r,\tau)-T_0\right]=\begin{cases}-\dfrac{q_л}{4\pi\lambda}Ei\left(-U(\tau)\right) \text{ при } 0<\tau<\tau_и;\\ -\dfrac{q_л}{4\pi\lambda}\left[Ei\left(-U(\tau)\right)-Ei\left(-U(\tau-\tau_и)\right)\right] \text{ при } \tau\ge\tau_и,\end{cases} \quad (1)$$

где $q_л$ – тепловой поток; T_0 – начальная температура исследуемого материала; $Ei(u)=\int\limits_{-\infty}^{u}\frac{e^t}{t}dt=-\int\limits_{-u}^{\infty}\frac{e^{-t}}{t}dt$ – интегральная показательная функция; $U(\tau)=\frac{r^2}{4a\tau}$, $U(\tau-\tau_и)=\frac{r^2}{4a(\tau-\tau_и)}$ – безразмерные функции величин r, τ, $\tau_и$; λ, a – теплопроводность и коэффициент температуропроводности соответственно.

Предлагаемая методика обработки экспериментальных данных базируется на использовании безразмерного параметра $\gamma=\frac{T(r,\tau)-T_0}{T_{\max}-T_0}$, который представляет

собой отношение разности температур $[T(r,\ \tau) - T_0]$ (в момент времени τ) к максимальному значению разности температур $[T(r,\ \tau) - T_0] = [T_{\max} - T_0]$ имеющему место в момент времени $\tau = \tau_{\max}$.

Расчетные соотношения для вычисления коэффициента температуропроводности и объемной теплоемкости имеют вид:

$$a = \frac{r^2}{4\tau' U(\tau')};\quad c\rho = \frac{q_{\text{л}}\tau}{\pi r^2 [T(r,\tau) - T_0]} U(\tau)\left\{ Ei\left[-U(\tau)\frac{\tau}{\tau - \tau_{\text{и}}} \right] - Ei\left[-U(\tau) \right] \right\}. \qquad (3)$$

На основе представленных в [8 – 11] рекомендаций разработана и изготовлена экспериментальная установка, включенная в состав информационно-измерительной системы (**ИИС**) (рис. 1).

В измерительную ячейку *1* помещаются две части образца плода яблока *8*, между которыми размещают термоэлектрический преобразователь *6* (термопара) типа ТХА с номинальной статической характеристикой ХА(К) и линейный нагреватель *7*, выполненный в виде тонкой металлической проволоки из константана, покрытой слоем лака. Сигнал термопреобразователя *6* поступает на аналоговый вход платы сбора данных *2* типа NI USB 9211 производства National Instruments (США), имеющей АЦП разрядностью 24 бит, предназначенной для коммутации сигнала термоэлектрического преобразователя и формирования его цифрового эквивалента. Сигнал термопары регистрируется и обрабатывается с применением программного обеспечения персонального компьютера *3*. Программа для обработки результатов эксперимента разрабатывалась в среде LabVIEW 2009. Управление коммутатором *5*, подключающим нагреватель *7* к блоку питания *4* на заданное время осуществляется также программно.

Полученный температурный отклик обрабатывается в программе и вычисляются коэффициент температуропроводности и объемная теплоемкость исследуемого материала [9].

В качестве объектов контроля использовались образцы яблок сорта «Айдаред» (Россия) разной влажности (рис. 2). Для каждого образца получена выборка из пяти измеренных значений теплофизических характеристик. Обработка измеренных значений позволила установить границы доверительного интервала с учетом коэффициента Стьюдента [8], которые отстоят от среднего значения на величину $\Delta a = \pm\ 0{,}16 \cdot 10^{-7}$ м^2/с и $\Delta\lambda = \pm\ 0{,}015$ Вт/(м·К) соответственно для коэффициента температуропроводности и теплопроводности растительной ткани. Измеренные значения в выборке получены для одного и того же плода яблока, но при разных положениях зонда.

Время активной стадии измерения теплопроводности и коэффициента температуропроводности, а также удельной объемной теплоемкости для одного исследуемого образца не превышает одной минуты. Напряжение, подаваемое на нагревательный элемент, выбирают таким, чтобы при исследовании температура объекта повышалась не более чем на 15 К, что вполне удовлетворяет требованиям сохранности первоначальных свойств исследуемого образца.

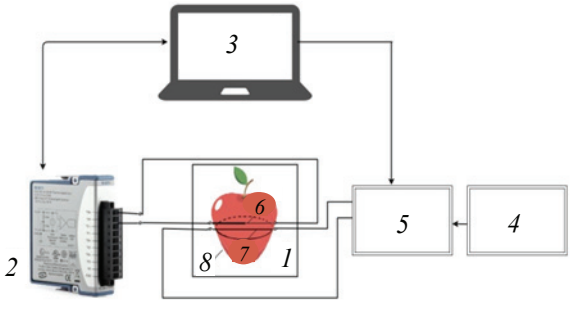


Рис. 1. Составные части экспериментальной установки, включенной в состав ИИС

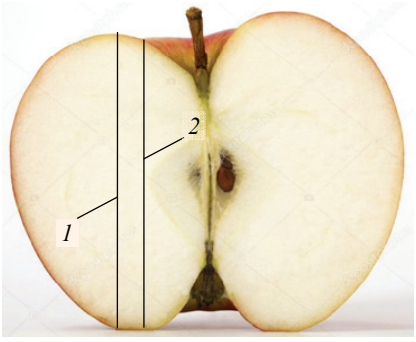


Рис. 2. Размещение термоэлектрического преобразователя и нагревателя на растительной ткани яблока:
1 – линейный нагреватель; *2* – термоэлектрический преобразователь

Эксперименты с внутренней растительной тканью яблока показали, что эффективные значения теплопроводности и коэффициента температуропроводности растительной ткани яблок сорта «Айдаред» отличаются у образцов с разной влажностью. Различие теплофизических свойств тканей может быть объяснено разным содержанием в них воды.

Учитывая, что случайная погрешность измерения значения эффективной теплопроводности растительных тканей значительно меньше погрешности измерения коэффициента температуропроводности, то предпочтительно пользоваться характеристикой, представленной на рис. 3, *а*. В этом случае, погрешность измерения влажности не превысит 7 %. Однако подход, приведенный в работе [14], позволяет надеяться, что указанный предел относительной погрешности можно значительно уменьшить за счет учета и стабилизации влияющих величин.

Функциональная зависимость влажности W, %, от теплопроводности λ (рис. 3, *а*) может быть выражена формулой $W = 6{,}4e^2\lambda^2 - 52\lambda + 4{,}5$, где e – основание натурального логарифма; от коэффициента температуропроводности a – $W = 52a^2 + 17a - 97$ (рис. 3, *б*).

Таким образом, представленная экспериментальная установка и основанная на ее использовании методика измерения влажности может быть использована как референтная методика [15] для оценки правильности измерений или для экспрессной калибровки других средств измерения, в частности гиперспектральной

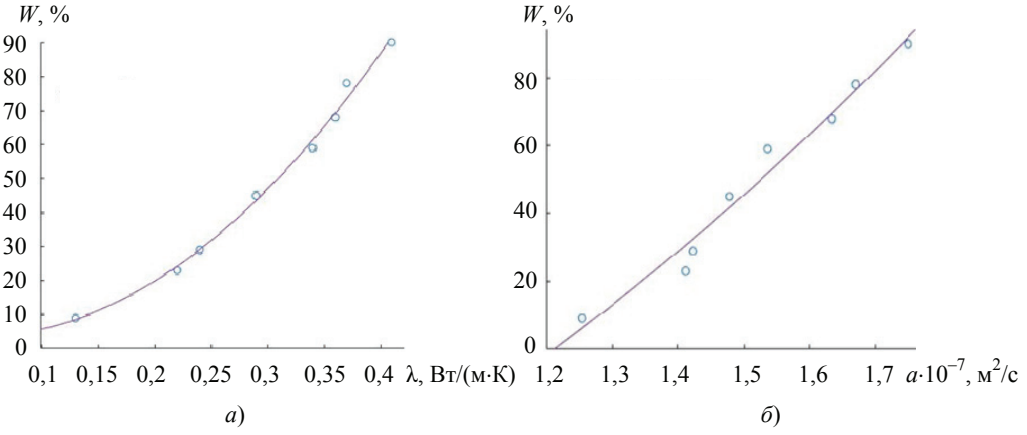


Рис. 3. Градуировочные характеристики для измерения влажности *W* растительной ткани яблока в зависимости от эффективных значений теплопроводности (*а*) и коэффициента температуропроводности (*б*)

камеры SPECIMFX10, используемой для измерения влажности твердых растительных материалов. Результаты определения теплофизических характеристик растительных тканей яблок могут быть также использованы для расчета режимных параметров процесса сушки яблок, а также других процессов, связанных с переносом тепла и влаги.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта по Соглашению № 05.604.21.0240 от 02.12.2019. Уникальный идентификатор соглашения RFMEFI60419X0240.

Список литературы

1. Секанов, Ю. П. Влагометрия сельскохозяйственных материалов / Ю. П. Секанов. – М. : Агропромиздат, 1985. – 160 с.

2. Раулов, Д. А. Исследование перспективных методов автоматического контроля влажности сыпучих и кусковых материалов на основе анализа современных промышленных влагомеров / Д. А. Раулов, Н. В. Аринова // Евразийское Научное Объединение. – 2017. – Т. 1, № 12 (34). – С. 59 – 62.

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

4. Теплофизические измерения и приборы / Е. С. Платунов, С. Е. Буравой, В. В. Курепин, Г. С. Петров ; под ред. Е. С. Платунова. – Л. : Машиностроение, 1986. – 256 с.

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

6. Теплофизические измерения : учеб. пособие / Е. С. Платунов, И. В. Баранов, С. Е. Буравой, В. В. Курепин. – СПб. : Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий, 2010. – 738 с.

7. Гуров, А. В. Экспериментальная установка для измерения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов методом плоского «мгновенного» источника теплоты / А. В. Гуров // Метрология. – 2013. – № 4. – С. 16 – 24.

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

9. Оптимизация измерений теплофизических параметров теплоизоляционных материалов методом линейного импульсного источника теплоты / С. В. Пономарев, В. О. Буланова, А. Г. Дивин, Е. В. Буланов // Метрология. – 2017. – № 2. – С. 10 – 19.

10. Установка для измерения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов методами линейного и плоского импульсных источников теплоты / В. О. Буланова, Е. В. Буланов, С. В. Пономарев, А. Г. Дивин // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2019. – Т. 62, № 11. – С. 1022 – 1029.

11. Оптимизация измерений теплофизических свойств теплоизоляционных материалов / С. В. Пономарев, В. О. Буланова, А. Г. Дивин, Е. В. Буланов // Метрология. – 2015. – № 4. – С. 40 – 51.

12. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М. : Высшая школа, 1967. – 599 с.

13. Акулинин, И. Н. Автоматизированная система для определения зависимости теплофизических свойств твердых полимерных материалов от температуры и давления / И. Н. Акулинин, П. С. Беляев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2010. – Т. 16, № 3. – С. 545 – 549.

14. Погрешности измерений влажности кокса методом ИК-спектроскопии / С. В. Медведевских, М. Ю. Медведевских, Л. К. Неудахина, Е. П. Собина // Аналитика и контроль. – 2006. – Т. 10, № 1. – С. 85 – 88.

15. РМГ 29-2013 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения. – Взамен РМГ 29-99 ; введ. 2015-01-01. – М. : Стандартинформ, 2014. – 59 с.

Using the Method of Pulsed Heat Source to Control the Moisture of Plant Tissues of Apples

V. O. Bulanova

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

Keywords: humidity; measurement; measuring installation; structural size; thermal diffusivity coefficient; data processing; plant tissue; heat pulse.

Abstract: A method for measuring the moisture of vegetable tissues of apples based on the dependence of thermal conductivity and thermal diffusivity of materials on their moisture is proposed. A measuring device was developed to determine the indicated thermophysical quantities by the linear pulsed heat source method, which was used in the course of measurements of the thermophysical characteristics of plant tissues of apples of known moisture. The obtained experimental dependences are approximated by polynomials that can be used to control the moisture content in apples and the express calibration of moisture meters used in non-destructive measurements of moisture and assess the degree of wilting of apples.

References

1. Sekanov Yu.P. *Vlagometriya sel'skokhozyaystvennykh materialov* [Moisture measurement of agricultural materials], Moscow: Agropromizdat, 1985, 160 p. (In Russ.)

2. Raulov D.A., Arinova N.V. [Research of advanced methods for automatic control of moisture content of bulk and lump materials based on the analysis of modern industrial moisture meters], *Yevraziyskoye Nauchnoye Ob"yedineniye* [Eurasian Scientific Association], 2017, vol. 1, no. 12 (34), pp. 59-62. (In Russ.)

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

4. Platunov Ye.S. [Ed.], Buravoy S.Ye., Kurepin V.V., Petrov G.S. *Teplofizicheskiye izmereniya i pribory* [Thermophysical measurements and instruments], Leningrad: Mashinostroyeniye, 1986, 256 p. (In Russ.)

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

6. Platunov Ye.S., Baranov I.V., Buravoy S.Ye., Kurepin V.V. *Teplofizicheskiye izmereniya: uchebnoye posobiye* [Thermophysical measurements: a training manual], St. Petersburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet nizkotemperaturnykh i pishchevykh tekhnologiy, 2010, 738 p. (In Russ.)

7. Gurov A.V. [Experimental setup for measuring the thermophysical properties of heat-insulating materials by the method of a planar “instant” heat source], *Metrologiya* [Metrology], 2013, no. 4, pp. 16-24. (In Russ., abstract in Eng.)

8. Zaydel A.N. *Oshibki izmereniy fizicheskikh velichin* [Errors of measurements of physical quantities], Leningrad: Nauka, 1974, 108 p. (In Russ.)

9. Ponomarev S.V., Bulanova V.O., Divin A.G., Bulanov Ye.V. [Optimization of measurements of thermophysical parameters of heat-insulating materials by the linear pulse heat source method], *Metrologiya* [Metrology], 2017, no. 2, pp. 10-19. (In Russ., abstract in Eng.)

10. Bulanova V.O., Bulanov Ye.V., Ponomarev S.V., Divin A.G. [Installation for measuring the thermophysical properties of insulating materials by linear and planar pulsed heat sources], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroyeniye*

[Proceedings of higher educational institutions. Instrument making], 2019, vol. 62, no. 11, pp. 1022-1029. (In Russ., abstract in Eng.)

11. Ponomarev S.V., Bulanova V.O., Divin A.G., Bulanov Ye.V. [Optimization of measurements of thermophysical properties of heat-insulating materials], *Metrologiya* [Metrology], 2015, no. 4, pp. 40-51. (In Russ., abstract in Eng.)

12. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of thermal conductivity], Moscow: Vysshaya shkola, 1967, 599 p. (In Russ.)

13. Akulinin I.N., Belyayev P.S. [Automated system for determining the dependence of the thermophysical properties of solid polymer materials on temperature and pressure], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2010, vol. 16, no. 3, pp. 545-549. (In Russ., abstract in Eng.)

14. Medvedevskikh S.V., Medvedevskikh M.Yu., Neudachina L.K., Sobina Ye.P. [Errors of measurements of coke moisture by IR spectroscopy], *Analitika i kontrol'* [Analytics and control], 2006, vol. 10, no. 1, pp. 85-88. (In Russ., abstract in Eng.)

15. *RMG 29-2013 GSI. Metrologiya. Osnovnyye terminy i opredeleniya* [RMG 29-2013 GSI. Metrology. Key terms and definitions], Moscow: Standartinform, 2014, 59 p. (In Russ.)

Anwendung der Pulswärmequellenmethode zur Kontrolle des Feuchtigkeitsgehalts von pflanzlichen Geweben der Äpfel

Zusammenfassung: Es ist eine Methode zur Messung der Feuchtigkeit von pflanzlichen Geweben der Äpfel vorgeschlagen, die auf der Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit und des Koeffizienten der Temperaturleitfähigkeit der Materialien von ihrer Feuchtigkeit basiert. Um die angegebenen thermophysikalischen Größen durch das lineare gepulste Wärmequellenverfahren zu bestimmen, ist ein Messgerät entwickelt, das im Verlauf von Messungen der thermophysikalischen Eigenschaften von pflanzlichen Geweben der Äpfel bekannter Feuchtigkeit verwendet wurde. Die erhaltenen experimentellen Abhängigkeiten sind durch Polynome angenähert, die zur Kontrolle des Feuchtigkeitsgehalts in Äpfeln und zur Expresskalibrierung der Feuchtigkeitsmessgeräte verwendet werden können, die bei zerstörungsfreien Feuchtigkeitsmessungen, und zur Beurteilung des Welkungsgrades von Äpfeln benutzt werden.

Application de la méthode de la source de chaleur pulsée pour le contrôle de l'humidité des tissus végétaux des pommes

Résumé: Est proposée une méthode de la mesure de l'humidité des tissus végétaux des pommes basée sur la dépendance de la conductivité thermique et du coefficient de conductivité thermique des matériaux de leur humidité. Est mis au point un appareil de mesure pour déterminer les valeurs thermiques spécifiées par la méthode de la source de chaleur pulsée linéaire utilisée lors de la mesure des caractéristiques thermiques des tissus végétaux des pommes d'une humidité connue. Les dépendances expérimentales reçues sont approximées en fonction des polynômes qui peuvent être utilisés pour le contrôle de la teneur en humidité dans les pommes et de l'étalonnage des hygromètres utilisés lors des mesures non destructives de l'humidité et de l'évaluation du degré de l'étiolement des pommes.

Автор: ***Буланова Валентина Олеговна*** – аспирант кафедры «Мехатроника и технологические измерения», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: ***Беляев Павел Серафимович*** **–** доктор технических наук, профессор кафедры «Материалы и технология», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

УДК 681.518
DOI: 10.17277/vestnik.2020.01.pp.033-042

УПРАВЛЕНИЕ РЕСУРСНЫМ ПЛАНИРОВАНИЕМ ПРОЕКТОВ НА ПРИМЕРЕ СОСТАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО РАСПИСАНИЯ

В. Г. Матвейкин[1], В. А. Немтинов[2], Б. С. Дмитриевский[1], М. В. Лемкина[1], А. А. Терехова[1], П. К. Правин[2]

Кафедры: «Информационные процессы и управление» (1), «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении» (2), terehova.aa@mail.tstu.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия

Ключевые слова: информационные потоки; календарное планирование; проект; управление; функционально-информационная модель; цифровые технологии.

Аннотация: Проанализировано технико-экономическое состояние промышленного предприятия как объекта управления. Выявлена обобщенная структура и функциональные задачи подразделений. Обозначены возможности цифровизации календарного планирования во всех участвующих подразделениях. Сформулирована задача управления и рассмотрены вопросы интеграции разрабатываемой системы календарного планирования в корпоративную систему. Выявлены требования к системе по перечню решаемых задач. Проанализирована взаимосвязь между подразделениями и возникающими в процессе планирования потоками данных и документооборотом. Обоснованы преимущества системы управления календарным планированием. В рамках разработки системы рассмотрена функционально-информационная модель планирования производственного расписания.

Введение

В связи с переходом промышленных предприятий на новый уровень цифрового управления [1 – 6], в частности при цифровизации цехов, создается единая корпоративная система управления ресурсным планированием проектов [7 – 9].

Научно обоснованные календарно-плановые нормативы (**КПН**) являются основой качественного составления производственного расписания, служат исходной базой для составления взаимосвязанных планов, обеспечивающих равномерную работу рабочих мест, участков, цехов и эффективное использование основных фондов, материальных и трудовых ресурсов, облегчают оперативный контроль за ходом производства и регулирование производственного процесса.

Состав КПН различен в зависимости от типа производства и других факторов. Основными КПН являются размеры и ритмы партий деталей, сборочных единиц и изделий; длительность производственных циклов обработки партий деталей, сборки сборочных единиц и изделий; опережения запуска и выпуска партий деталей и сборочных единиц; размеры заделов.

В реальных условиях производства компетентно составленный календарный план позволяет существенно повысить его эффективность, сократить издержки, что в конечном итоге влияет на результат финансовой деятельности предприятия.

Разработка и реализация календарного плана проходит длительный путь от построения календарного графика, определяющего моменты начала и окончания каждой операции, до этапа производства. В условиях рынка производственный цикл необходимо уменьшать, не снижая при этом качества выпускаемой продукции. Необходимо динамично реагировать на изменения ситуации на занимаемом секторе рынка, чтобы быть конкурентоспособным. Такая работа требует хранения большого количества информации и сложных математических моделей. Поэтому для повышения эффективности работы предприятия необходима цифровизация составления производственного расписания [10, 11].

Определение функционально-информационных связей промышленного предприятия

На промышленном предприятии, как правило, организована централизованная система управления, где все начальники отделов и подразделений непосредственно подчиняются директору или его заместителям. Система состоит из трех управленческих уровней, где первый уровень – директор, второй – заместители директора, третий – начальники отделов и подразделений.

В структуре предприятия выделяются следующие службы: техническая, производственная, экономическая, снабженческо-сбытовая (маркетинга), кадров и пр.

Техническая служба состоит из следующих отделов: конструкторско-технологического, главного механика, главного энергетика, охраны труда и техники безопасности, стандартизации и технического контроля, эксплуатационно-ремонтного.

Технические службы обеспечивают техническое развитие производства, бесперебойную работу оборудования, совершенствуют технику и технологию производства, выполняют мероприятия по охране окружающей среды и обеспечению пожарной безопасности предприятия.

Эксплуатационно-ремонтный отдел отвечает за своевременное и высококачественное восстановление изделий, выпущенных предприятием, в эксплуатирующих организациях, отдел технического контроля – за выпуск продукции, соответствующей требованиям стандартов.

Производственная служба состоит из производственного отдела и производства (цехов). Она получает материально-технические ресурсы, производит готовую продукцию, передает продукцию на склад, составляет отчет по производственной деятельности.

Экономическая служба состоит из следующих отделов: планово-экономического, организации труда и заработной платы, бухгалтерии, финансового. Данные подразделения руководят методически и координируют деятельность всех подразделений предприятия по разработке перспективных и текущих планов, а также мероприятий по совершенствованию хозяйственного механизма, выполняют работы по совершенствованию планирования экономических и финансовых показателей деятельности предприятия по созданию нормативов трудовых затрат. Обеспечивают соблюдение режима экономии материальных, трудовых и финансовых ресурсов на всех участках хозяйственной деятельности предприятия. Организуют работу по рациональной плановой и учетно-отчетной документации, занимаются сбором первичной информации, ее автоматизированной обработкой.

Снабженческо-сбытовая служба состоит из следующих отделов: материально-технического обеспечения, комплектации и кооперации, маркетинга и сбыта. Данные службы обеспечивают производство необходимыми материалами и комплектующими изделиями, собирают информацию о рынке, структуре и динамике спроса и цен, принимают готовые изделия на ответственное хранение и реализуют готовую продукцию потребителям.

Служба кадров состоит из следующих отделов: кадров и технического обучения, охраны, группы информационно-аналитической работы. К функциям данной службы относятся: учет личного состава предприятия; комплектование предприятия кадрами с учетом состава работающих (прием, увольнение, обучение) с изучением движения кадров, причин текучести кадров и принятием мер по трудоустройству высвобождаемых работников; организация контроля за состоянием трудовой дисциплины в подразделениях предприятия и соблюдение работающими правил внутреннего трудового распорядка; организация режима работы предприятия, бюро пропусков, военизированной охраны; сохранности материальных ценностей, охраны и обороны объекта в процессе деятельности предприятия.

К прочим службам предприятия относятся: юридическое бюро, задачи которого заключаются в соблюдении законности в деятельности предприятия, защите его правовых интересов; административно-хозяйственный отдел – обеспечение содержания в надлежащем техническом, санитарном и противопожарном состоянии закрепленных зданий и помещений, прилегающих к ним территорий, текущих и капремонтов; штаб гражданской обороны – организация обеспечения работников предприятия индивидуальными средствами защиты и защитными сооружениями, а также проведение мероприятий по повышению устойчивости работы объекта в чрезвычайных ситуациях; оснащение и поддержание в постоянной готовности формирований гражданской обороны; обучение личного состава.

Формулировка задачи управления и исследование информационных потоков

Целью функционирования промышленного предприятия является объединение экономических интересов, материальных, трудовых и финансовых ресурсов для удовлетворения потребностей в продукции, услугах предприятия и извлечения прибыли.

Непременным условием эффективного функционирования предприятия является его техническая оснащенность: наличие достаточного количества зданий, сооружений, то есть помещений, необходимых для осуществления производственной и управленческой деятельности; оборудование, с помощью которого будут проводиться исследования и непосредственно оборудование для производства разработанных продуктов; необходимо использовать новые технологии проектирования производственной деятельности, управления информационными потоками на предприятии. Для реализации данных задач требуются определенные ресурсы.

Для внедрения новых технологий, производства более совершенной продукции необходимы инвестиции. Перед предприятием стоит задача управления всей этой деятельностью: управление экономической информацией, производственными процессами, документооборотом, системой безопасности. Назначение корпоративной системы – управление проектами на уровне корпорации.

Основными требованиями к системе управления являются:

1. Система должна быть функциональной и адаптивной к изменяющимся условиям ее функционирования. Она должна включать в себя возможность изменять ее структуру с течением времени, добавлять новые функции, обеспечивать бесперебойное функционирование, устойчивость к возникновению ошибок.

2. Система должна обеспечивать разделенный доступ к данным, каждый пользователь имеет доступ только к определенной группе данных, с которой он работает, система должна включать в себя возможность распределения способа доступа к ее частям различным пользователям.

С внешними организациями система связана посредством отдела маркетинга, из которого поступают заказы на определенные виды продукции, производимой предприятием. Отдел маркетинга поставляет в систему информацию о количестве заказов и их ассортименте, количестве каждого вида продукции, сроках выполне-

ния и предъявляемых требований по качеству. Эта информация является наиболее критической, так как в конечном итоге формирует конечный портфель заказов. Все остальные связи строятся между подразделениями во внутренней среде и не имеют прямых выходов во внешнюю.

Система взаимодействует со складами. Со склада сырья и материалов поступает информация о наличии необходимого сырья на планируемый период, а уходят распоряжения о транспортировки этого сырья в цеха. Со склада готовой продукции поступает информация о наличии резерва готовой продукции. Взаимодействие со складом готовой продукции позволяет организовать своевременный ее отток из цехов на склад.

Состав производственных мощностей – количество станков, нормы их производительности, порядок обеспечения работ. При детализации календарного плана составляются по дневные (посменные) загрузки единиц оборудования.

Техническая служба разрабатывает технологию производства продукции, количество отдельных этапов, то есть производственную программу и технические процессы, которые в дальнейшем в системе станут этапами производственного цикла.

Еще один вид взаимосвязи между подразделениями обуславливается движением продукции в течение всего производственного цикла от одного цеха к другому. Такие взаимосвязи регламентируются отчетами о фактических остатках деталей в заделах.

Необходимо сформировать календарные планы потребностей продаж и производства для обеспечения заказов. Таким образом, планируется изменение остатков на складе готовой продукции на планируемый период. Составляется готовый к исполнению календарный план производства и обеспечения продаж. Со складов в систему поступают данные о номенклатуре оставшихся товаров, а обратно отправляются планируемые остатки в новом периоде. План производства координируется незаконченными в прошлом плановом периоде работами и проектами, которые возникают из-за попадания одного и того же производственного процесса в разные временные этапы.

Таким образом, динамический календарный план потребностей производства постоянно оперирует с данными складов о наличии сырья и количестве готовой продукции, а также с отделом маркетинга по вопросам обеспечения новых заказов и выполнения, находящихся на стадии производства.

Отдел маркетинга поставляет в систему следующие данные о новом заказе на производство продукции: номер заказа, ассортимент, количество продукции каждого вида, сроки поставки, требования по качеству.

В технической службе разрабатывается технология производства и поступают следующие данные: количество операций при производстве продукта и их последовательность, продолжительность каждой операции, оборудование, необходимое для проведения и выполнения операции, и время его подготовки; информация о составе производственных мощностей: расположение оборудования по цехам, количество групп однородного оборудования, количество оборудования в каждой группе, отчет о выполнении плана за прошлый период.

Со склада сырья поступает информация о наличии отдельных видов сырья и материалов, а также их количестве. Со склада готовой продукции – ассортимент резервов готовой продукции, количество резервов готовой продукции.

Одновременно в самой системе хранится информация о незавершенном в прошлом плановом периоде производстве, которая будет входной для создания нового календарного плана на текущий период.

Результирующими документами являются диаграммы оперативно календарного планирования и сводные отчеты:

– отображения критического пути, расчетных и фактических дат начала и окончания работ, длительности, резервов работ, многоуровневости детализации задач, возможности задания различных типов сетевой диаграммы, ручное и автоматическое размещения работ и связей, определения дополнительной информации;

– по состоянию выполнения расписания;

– по ресурсам и их назначению;

– профилей загрузки ресурсов;

– по затратам (могут включать стоимости: запланированную и фактическую; отдельных задач; ресурса по задачам; детализацию стоимости задач по ресурсам);

– по денежным потокам;

– для анализа фактического состояния выполнения задач проекта и сравнения с запланированным.

Функционально-информационная модель производственного расписания

Представим работу системы управления планированием производственного расписания в виде функционально-информационной модели (рис. 1). На рисунке 2 представлен первый уровень детализации функционально-информационной модели производственного расписания.

В условиях применения цифровых технологий и создания автоматизированных рабочих мест пользователей практически вся работа специалистов планово-экономического и производственно-технического отдела сводится к введению в компьютер исходной и получению результативной информации, а все расчеты проводятся автоматически на компьютере с учетом настроек расчетов, выбранных специалистами.

Для проведения расчетов системе необходимо получить исходную информацию, которая делится на условно-постоянную и условно-переменную или оперативную.

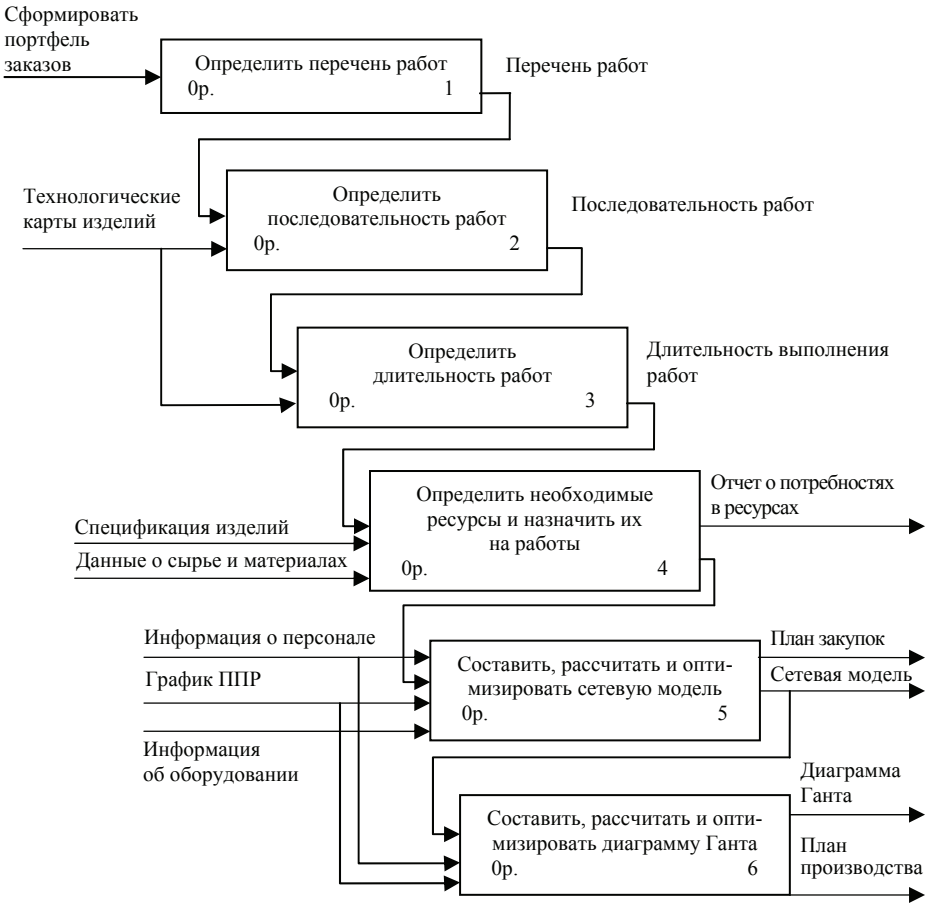
С введением цифровизации изменится принципиальный подход к хранению информации. Все результаты можно будет получить из системы в едином стиле оформления документов. Применение цифровых технологий для решения указанных выше

Рис. 1. Функционально-информационная модель производственного расписания

а)

б)

Рис. 2. Первый уровень детализации функционально-информационной модели производственного расписания процессов (начало):
а – «Составить производственное расписание»; *б* – «Выполнить расчет базового расписания»



в)

Рис. 2. Окончание:
в – «Составить план-график выполнения работ»

задач не потребует внесения изменений в управляющие или исполнительные органы, изменения затронут только содержимого труда работников промышленного предприятия.

Заключение

Для крупного производства с разветвленным технологическим процессом нерациональное распределение ресурсов может привести к длинным очередям работ на отдельных участках, а в это время другое оборудование будет простаивать, что, в конечном итоге, исключит возможность выполнения в срок некоторых заказов. Это наиболее актуально при выпуске сложных изделий, состоящих из большого количества деталей, узлов, сборок, из-за чего невозможно точно спланировать во времени выпуск всех компонентов изделия и срок выполнения заказа. Поэтому качество разработки планов в современных условиях возможно только на основе цифрового управления.

Применение цифровых технологий существенно изменяет характер деятельности управленческого персонала предприятия и роль лица, принимающего

решение. Практика принятия решений показывает, что большинство ответственных решений принимается не по классической схеме, а в результате диалога. Для этой цели служат интерактивные процедуры, позволяющие лицу, принимающему решение, активно воздействовать на подготовку и выбор управленческих решений, а также проводить имитацию реальных экономических и производственных процессов при различных вариантах решений.

Использование цифрового управления позволит автоматизировать процесс составления производственного расписания, сделает его менее трудоемким и предоставит возможность прогнозировать и адекватно принимать решения, снизить ошибки при планировании, долю материальных запасов, текущие издержки производства и увеличить оперативность действий персонала.

Разработанная цифровая система управления позволяет повысить эффективность функционирования технологического процесса за счет своевременного принятия управленческих решений.

Список литературы

1. Битюков, В. К. Качественный анализ функционирования сетевой системы управления с конкурирующим методом доступа / В. К. Битюков, А. Е. Емельянов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, № 1. – С. 38 – 46.

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

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

4. Попов, Н. С. К методике конструирования экспертной системы оценки промышленной безопасности / Н. С. Попов, Н. В. Лузгачева, М. Т. Чан // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2013. – Т. 19, № 1. – С. 43 – 51.

5. Серов, А. Ю. Действующая компьютерная модель производственного предприятия / А. Ю. Серов, А. В. Сморгонский // Экономика и математические методы. – 2009. – Т. 45, № 3. – С. 40 – 47.

6. Еремеев, А. П. Прототип интеллектуальной системы поддержки принятия решений для управления энергообъектом / А. П. Еремеев, Л. С. Денисенко // Программные продукты и системы. – 2002. – № 3. – С. 38 – 42.

7. Мазур, И. И. Управление проектами / И. И. Мазур, В. Д. Шапиро, Н. Г. Ольдерогге. – 3-е изд. – М. : Омега-Л, 2006. – 657 с.

8. Matveykin, V. G. Designing of Management System of Innovative-Production System / V. G. Matveykin, B. S. Dmitrievsky, I. S. Panchenko // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 17, № 2. – С. 289 – 296.

9. Дмитриевский, Б. С. Автоматизированные информационные системы управления инновационным наукоемким предприятием / Б. С. Дмитриевский. – М. : Машиностроение-1, 2006. – 156 с.

10. Системы диспетчеризации и управления : учеб. пособие / В. Г. Матвейкин, Б. С. Дмитриевский, И. С. Панченко, М. В. Кокорева. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013. – 96 с.

11. Дмитриевский, Б. С. Бизнес-модель управления планированием на наукоемком предприятии / Б. С. Дмитриевский // Приборы и Системы. Управление, Контроль, Диагностика. – 2007. – № 5. – С. 66 – 67.

Resource Planning of Projects Using the Example of Industrial Project Scheduling

V. G. Matveykin[1], V. A. Nemtinov[2], B. S. Dmitrievsky[1], M. V. Lemkina[1], A. A. Terekhova[1], P. K. Pravin[2]

Departments of Information Processes and Management (1), Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering (2), terehova.aa@mail.tstu.ru; TSTU, Tambov, Russia

Keywords: information flows; scheduling project; control; functional information model; digital technology.

Abstract: The technical and economic state of an industrial enterprise as an object of management is analyzed. The generalized structure and functional tasks of the units are revealed; the possibilities of digital-vision of scheduling in all participating units are indicated. The management task is formulated and issues of integration of the developed calendar planning system into the corporate system are considered. The requirements for the system are identified according to the list of tasks to be solved, the relationship between the departments and the resulting data flows and document flow are analyzed. The advantages of the scheduling management system are substantiated. As part of the development of the system, a functional-informational model for planning production schedules is considered.

References

1. Bityukov V.K., Yemel'yanov A.Ye. [Qualitative analysis of the functioning of a network control system with a competing access method], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 1, pp. 38-46. (In Russ., abstract in Eng.)

2. Bityukov V.K., Yemel'yanov A.Ye. [A generalized mathematical model of a network control system with a competing access method], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 2, pp. 319-326. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Kudryashov V.S., Tikhomirov S.G., Ryazantsev S.V., Ivanov A.V., Kozenko I.A. [Simulation method of a multiply-connected digital system for controlling ammonia synthesis], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 4, pp. 572-580, doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.572-580 (In Russ., abstract in Eng.)

4. Popov N.S., Luzgacheva N.V., Chan M.T. [On the methodology of designing an expert system for assessing industrial safety], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2013, vol. 19, no. 1, pp. 43-51. (In Russ., abstract in Eng.)

5. Serov A.Yu., Smorgonskiy A.V. [The current computer model of a manufacturing enterprise], *Ekonomika i matematicheskiye metody* [Economics and Mathematical Methods], 2009, vol. 45, no. 3, pp. 40-47. (In Russ.)

6. Yeremeyev A.P., Denisenko L.S. [Prototype of an intelligent decision support system for managing an energy facility], *Programmnyye produkty i sistemy* [Software products and systems], 2002, no. 3, pp. 38-42. (In Russ.)

7. Mazur I.I., Shapiro V.D., Ol'derogge N.G. *Upravleniye proyektami* [Project Management], Moscow: Omega-L, 2006, 657 p. (In Russ.)

8. Matveykin V.G., Dmitrievsky B.S., Panchenko I.S. Designing of Management System of Innovative-Production System, *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2011, vol. 17, no. 2, pp. 289-296. (In Eng., abstract in Russ.)

9. Dmitriyevskiy B.S. *Avtomatizirovannyye informatsionnyye sistemy upravleniya innovatsionnym naukoyemkim predpriyatiyem* [Automated information systems for managing innovative high-tech enterprise], Moscow: Mashinostroyeniye-1, 2006, 156 p. (In Russ.)

10. Matveykin V.G., Dmitriyevskiy B.S., Panchenko I.S., Kokoreva M.V. *Sistemy dispetcherizatsii i upravleniya: uchebnoye posobiye* [Sys-topics of dispatching and control: a training manual], Tambov: Izdatel'stvo FGBOU VPO «TGTU», 2013, 96 p. (In Russ.)

11. Dmitriyevskiy B.S. [The business model of planning management in a science-intensive enterprise], *Pribory i Sistemy. Upravleniye, Kontrol', Diagnostika* [Devices and Systems. Management, Control, Diagnostics], 2007, no. 5, pp. 66-67. (In Russ., abstract in Eng.)

Verwaltung der Projektressourcenplanung am Beispiel der Erstellung des Produktionszeitplans

Zusammenfassung: Es ist der technische und wirtschaftliche Zustand des Industrieunternehmens als Managementobjekt analysiert. Die verallgemeinerte Struktur und die funktionalen Aufgaben der Einheiten sind festgestellt, die Möglichkeiten der Digitalisierung der Terminplanung in allen teilnehmenden Einheiten sind aufgezeigt. Die Verwaltungsaufgabe ist formuliert und die Fragen der Integration des entwickelten Kalenderplanungssystems in das korporative System sind betrachtet. Die Anforderungen an das System sind anhand der Liste der zu lösenden Aufgaben ermittelt, der Zusammenhang zwischen den Abteilungen und den daraus resultierenden Datenflüssen und der Dokumentendurchlauf sind analysiert. Die Vorteile des Kalenderplanungsmanagementsystems sind begründet. Im Rahmen der Entwicklung des Systems ist ein funktional-informatives Modell zur Planung der Produktionspläne betrachtet.

Gestion de la planification de ressources des projets à l'exemple de la conception du calandrier de la production

Résumé: Est analysée la situation technico-économique de l'entreprise industrielle en tant qu'objet de la gestion. Est montrée la structure globale et les tâches fonctionnelles des unites; sont fixées les possibilités de la numérisation de la planification du calendrier dans toutes les unités participantes. Est définie la tâche de la gestion et sont envisages les questions relatives à l'intégration du système de la planification du calendrier dans le système corporatif. Sont formulés les besoins du système d'après la liste des tâches à accomplir; est analysée l'interaction entre les services et les flux de données et de documents qui en résultent. Sont justifiés les avantages du système de la gestion de la planification du calendrier. Dans le cadre de la conception du système est examiné le modèle fonctionnel et informatif de la planification des horaires de la production.

Авторы: ***Матвейкин Валерий Григорьевич*** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные процессы и управление»; ***Немтинов Владимир Алексеевич*** – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; ***Дмитриевский Борис Сергеевич*** – доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные процессы и управление»; ***Лемкина Мария Владимировна*** – аспирант кафедры «Информационные процессы и управление»; ***Терехова Анастасия Андреевна*** – старший лаборант кафедры «Информационные процессы и управление»; ***Правин Правин Кумар*** – магистрант, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: ***Мокрозуб Владимир Григорьевич*** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

УДК 004.021
DOI: 10.17277/vestnik.2020.01.pp.043-055

РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА ВИРТУАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА ОРГАНИЧЕСКИХ КРАСИТЕЛЕЙ

В. А. Немтинов[1], Ю. В. Немтинова[1,2], И. М. Манаенков[1]

Кафедра «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении» (1), kafedra@mail.gaps.tstu.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ»; кафедра менеджмента, маркетинга и рекламы (2), ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет им. Г. Р. Державина», г. Тамбов, Россия

Ключевые слова: виртуальная лаборатория; имитационное моделирование; процессы производств органических красителей; прототип.

Аннотация: Предложен подход к созданию прототипа виртуальной технологической лаборатории по изучению процессов производства органических красителей в программной среде системы vAcademia. Для создания элементов лаборатории использованы инструменты различных систем: двух- и трехмерные системы проектирования – SketchUp, AutoCAD, КОМПАС-3D; графические и видеоредакторы – Adobe Photoshop, The GIMP, Photoscape, Windows Movie Maker, SONY Vegas Pro; визуальный инструмент моделирования динамических систем SIMUL8; программное обеспечение для работы с таблицами и текстом Microsoft Office. Виртуальная лаборатория создана в целях имитации реальной лабораторной среды и производимых в ней процессов, а также моделирования учебной среды, в которой студенты трансформируют свои теоретические знания в практические знания и навыки экспериментальным путем.

Введение

Под виртуальной реальностью понимают новую концепцию использования современных вычислительных систем и человеко-машинного интерфейса в целях получения эффекта трехмерного окружения, в котором у пользователя появляется возможность в интерактивном режиме взаимодействовать с виртуальными объектами, благодаря чему создается ощущение трехмерного присутствия [1].

Первые виртуальные лаборатории возникли в 1990-е гг. XX века. В широком смысле под виртуальной лабораторией мы подразумеваем лабораторию (учебную аудиторию) как информационный ресурс, созданный средствами современных компьютерных технологий и представляющий в виртуальном пространстве оцифрованные версии объектов определенного тематического назначения [2].

Существует множество разных виртуальных миров, каждый из которых имеет 6 признаков, присущих всем мирам [3]:

– совместное пространство: участвовать в жизни мира могут одновременно много пользователей;

– графический пользовательский интерфейс: пространство в мире отражено виртуально и варьируется по стилю от 2D-«мультипликационного» изображения до более впечатляющих 3D-изображений;

– оперативность: общение происходит в режиме реального времени;

– интерактивность: мир позволяет участникам изменять, развивать, строить или принимать содержание, подобранное специально для него;

– постоянство: существование мира продолжается независимо от того, находятся ли отдельные пользователи в системе;

– общение / общество: мир дает возможность и содействует формированию социальных групп внутри мира, таких как команды, гильдии, клубы, клики, соседства, комьюнити и т.д.

В настоящее время понятие «виртуальная технологическая лаборатория» представляет собой программно-аппаратный комплекс, позволяющий проводить опыты без непосредственного контакта с реальной установкой или при полном отсутствии таковой. Таким образом, виртуальные лаборатории определяются двумя различными типами программно-аппаратных комплексов:

– лабораторной аудиторной установкой с удаленным доступом – дистанционные лаборатории;

– программным обеспечением, позволяющим моделировать лабораторные опыты – виртуальные лаборатории.

Сравнивая виртуальные и реальные лаборатории, выделим следующие преимущества виртуальных лабораторий:

– для проведения разного рода лабораторных работ нет необходимости приобретать дорогое оборудование. В результате недостаточного финансирования в большинстве лабораторий установлено старое оборудование, которое может давать не точные результаты опытов или искажать их и служить потенциальным источником опасности для обучающихся. Помимо этого существуют области, где для оборудования необходимо закупать расходные материалы, цены на которых достаточно высоки. Несмотря на то что программное обеспечение и компьютерное оборудование также стоит недешево, их широкая распространенность и универсальность компьютерной техники компенсирует этот недостаток;

– возможность моделирования большого набора процессов, протекание которых тяжело в реальных лабораторных условиях;

– безопасность – немаловажная причина и преимущество использования виртуальных лабораторий, особенно в тех случаях, когда идет работа с опасными материалами и высоковольтными устройствами;

– подробное и многостороннее представление (визуализация) на компьютере. В настоящее время современные компьютерные технологии позволяют увидеть и пронаблюдать в динамике процессы, которые трудно различить в реальных условиях без использования специализированной техники;

– возможность «масштабирования» времени. Это означает, что проводящий опыт или лабораторную работу может наблюдать в замедленном режиме процесс, протекающий в очень короткое (в долях секунды) время или напротив ускорить процесс, протекающий в длительное время (длящийся в течение нескольких лет), и это в свою очередь дает возможность глубже проникать в тонкости процессов;

– благодаря тому, что при моделировании виртуального процесса управление осуществляется через компьютер, появляется возможность проведения множества опытов с разными значениями входных параметров, необходимых для определения нужного результата.

Виртуальные лаборатории создаются в целях имитации реальной лабораторной среды и проводимых в ней процессов, в которой студенты трансформируют свои теоретические знания в практические знания и навыки экспериментальным путем. Также виртуальные лаборатории могут давать обучающимся значимые виртуальные ощущения, с помощью которых появляется способ повторить любой

неудавшийся эксперимент или расширить познания в практической части. Кроме достоинств в получении результатов, интерактивный характер таких методов обучения обеспечивает интуитивно понятную и приятную среду обучения и взаимодействия с виртуальной лабораторией.

В связи с этим в данной работе рассмотрены вопросы создания прототипа виртуальной технологической лаборатории по изучению процессов производств органических красителей, предназначенной для использования в образовательном процессе при подготовке специалистов химико-технологического профиля. В качестве базовой программной среды использовано программное обеспечение системы Academia.

Возможности виртуальной образовательной среды vAcademia

Виртуальная среда vAcademia - образовательный трехмерный виртуальный мир, который по сравнению с другими виртуальными мирами имеет два главных преимущества [1 – 4]:

– это специализированный мир для образования, а значит, в нем есть все, что необходимо для преподавателя и студентов на занятии: интерактивные доски, презентации, указки, веб-камеры, системы опроса, модели учебных объектов и т.д.;

– в vAcademia реализована возможность записывать занятия. В результате чего получаются 3D-записи, которые являются точной копией проведенных живых занятий. Данные записи можно посещать, как обычные занятия, по одному или группой, однако, в отличие от живых занятий, их можно редактировать, а также поправить занятие, удалив лишнее, или, наоборот, дополнить его новым содержанием.

Каждый пользователь в виртуальной среде представлен своим виртуальным воплощением (аватаром). Виртуальная среда дает возможность проведения учебных занятий в виде лекций, презентаций, семинаров, практических занятий, симуляций и серьезных игр, «круглых столов», тренингов, образовательных квестов. Также vAcademia поддерживает возможность проведения занятий для групп, включающих до 50 пользователей одновременно.

Прототип виртуальной технологической лаборатории по изучению процессов производств органических красителей

Прототип виртуальной технологической лаборатории по изучению процессов производств органических красителей предназначен для использования в образовательном процессе при подготовке специалистов химико-технологического профиля [5, 6].

Для создания элементов лаборатории использованы инструменты различных систем:

1) двух- и трехмерные системы проектирования: SketchUp, AutoCAD, КОМПАС-3D;

2) графические и видео-редакторы: Adobe Photoshop, The GIMP, Photoscape, Windows Movie Maker, SONY Vegas Pro;

3) визуальный инструмент моделирования динамических систем SIMUL8;

4) программное обеспечение для работы с таблицами и текстом Microsoft Office.

База оборудования, которое размещено в виртуальной лаборатории, включает в себя основное и вспомогательное оборудование для реализации процессов органического синтеза: аппараты с мешалками, емкости, насосы и т.п. [7, 8].

На рисунке 1 показана трансляция презентации. С помощью виртуальной доски можно смотреть презентации, перелистывание слайдов происходит как автоматически, так и вручную.

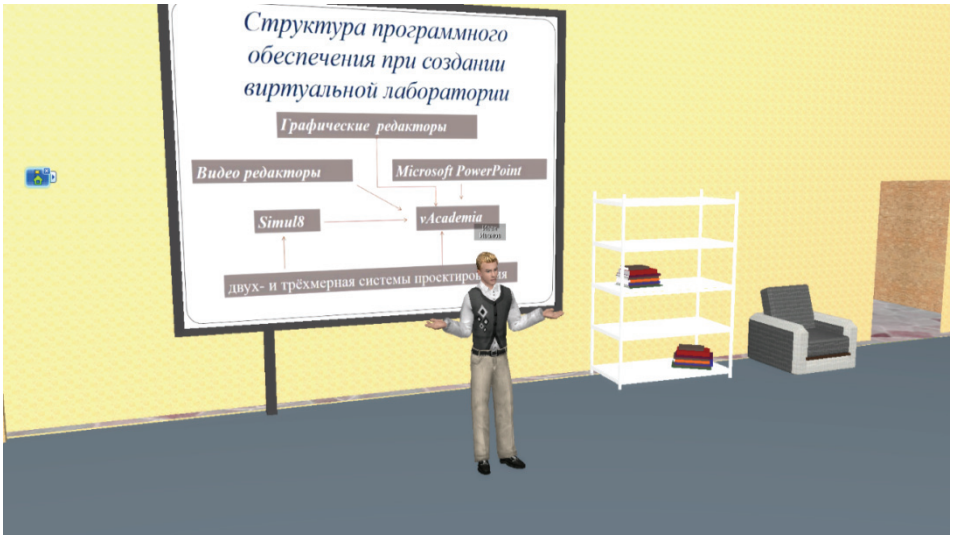


Рис. 1. Фрагмент трансляции презентации лаборатории на виртуальной доске

На рисунке 2 приведены примеры 3D-моделей, созданных в системе трехмерного моделирования КОМПАС-3D.

Прототип технологической установки по изучению производства органических красителей показан на рисунке 3.

На рисунке 4 изображена зона для отдыха с использованием как стандартных 3D-моделей, так и созданных с помощью систем автоматизированного проектирования.

В настоящее время многие промышленные производства представляют собой сложные динамические системы, характеризующиеся высоким уровнем неопределенности исходной информации и сложностью их поведения. Для решения многих проблем, связанных с управлением таких систем, а также для облегчения работы операторов и технологов химико-технологических систем можно использовать имитационное моделирование [9 – 11].

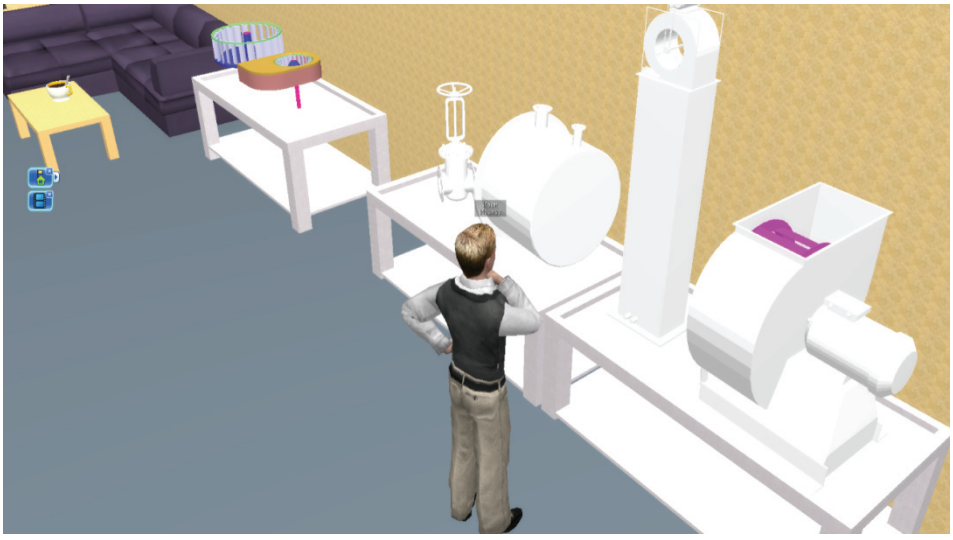


Рис. 2. Фрагмент моделей технологического оборудования лаборатории

Рис. 3. Визуализация технологической установки

Рис. 4 . Визуализация фрагмента зоны отдыха лаборатории

Информационно-логические модели технологических процессов производств органических красителей

Для исследования технологических процессов рассматриваемого в работе класса промышленных производств целесообразно использовать системы, позволяющие имитировать реальные процессы [12 – 14].

Компьютерная имитационная модель является удобным для системного аналитика вспомогательным средством для исследования химико-технологических объектов. Главным преимуществом имитационного моделирования является то, что эксперт может ответить на вопрос: «что будет, если … », то есть с помощью эксперимента на модели вырабатывать стратегию исследования.

В основе создания имитационных моделей лежат информационно-логические модели (**ИЛМ**), описывающие условия протекания технологических процессов.

В общем виде ИЛМ поддержки принятия решений при исследовании химико-технологического объекта представляет собой объединение множеств данных и связей между ними, записанных в виде правил. Отдельное продукционное правило (**ПМ**), содержащееся в базе знаний, состоит из двух частей: антецендента и консеквента. Антецедент представляет собой посылку правила (условную часть) и состоит из элементарных предложений, соединенных логическими связками «и, или». Консеквент (заключение) включает одно или несколько предложений, которые выражают либо некоторый факт, либо указание на определенное действие, подлежащее исполнению [7].

Таким образом, ИЛМ может быть представлена следующим кортежем [15 – 17]:

$$\mathrm{M} = \langle D,\ P \rangle,\ \ D = (d_1, \ldots, d_i, \ldots, d_N),\ \ P = \left(p_1, \ldots, p_j, ..., p_S\right),$$

где M – оператор ИЛМ; $d_1, \ldots, d_i, ..., d_N$ – множество данных ИЛМ; $p_1, \ldots, p_j, ..., p_S$ – множество правил.

Продукционные правила, входящие в состав модели, построены по типу: если … (условия выполняются), то … (реализация следствия). Конкретный вид ИЛМ для исследования химико-технологического объекта рассмотрен на примере определения стадии производства продукта в зависимости от характеристик исходного сырья: «характеристики исходного сырья и промышленных продуктов» – «стадии производства продукта», а также на примере определения типа оборудования: «стадии производства продукта» – «оборудование». Для этого использованы множества данных о характеристиках исходного сырья и промышленных продуктов $S_{\text{прод}}$ (табл. 1), стадиях производства продукта $St_{\text{прод}}$ (табл. 2) и оборудовании $Ob_{\text{прод.}}$ (табл. 3):

$$S_{\text{прод}} = \{s_{\text{прод},1},\ \ldots,\ s_{\text{прод},i},\ \ldots,\ s_{\text{прод},I}\},\ \ i = \overline{1, I}\ ;$$

$$St_{\text{прод}} = \{st_{\text{прод},1},\ \ldots,\ st_{\text{прод},j},\ \ldots,\ st_{\text{прод},J}\},\ \ j = \overline{1, J}\ ;$$

$$Ob_{\text{прод}} = \{ob_{\text{прод},1},\ \ldots,\ ob_{\text{прод},k},\ \ldots,\ ob_{\text{прод},K}\},\ \ k = \overline{1, K}\ .$$

Ниже приведены примеры правил по определению:

– стадии производства в зависимости от характеристики исходного сырья и промышленных продуктов;

– оборудования в зависимости от стадии производства продукта.

В качестве примера приведем содержание правила 1.

Правило 1: если ($S_{\text{прод},1}$ – слабощелочная реакция среды) & ($S_{\text{прод},2}$ – массовая концентрация бета-нафтола 243…245 г/дм^3) & ($S_{\text{прод},3}$ – массовая концентрация едкого натра 67…69 г/дм^3) & ($S_{\text{прод},4}$ – массовая концентрация разбавленного раствора серной кислоты 170…200 г/дм^3) & ($S_{\text{прод},5}$ – массовая доля раствора нитрита натрия 25 – 40 %), то стадия производства продукта $St_{\text{прод},1}$ – растворение.

В качестве примера приведем содержание правил 1, 2.

Правило 1: если $St_{\text{прод},1}$ – растворение, то оборудование $Ob_{\text{прод},1}$ – реактор для приготовления натриевой соли бета-нафтола.

Правило 2: если $St_{\text{прод},2}$ – нитрозирование, то оборудование $Ob_{\text{прод},2}$ – реактор для нитрования бета-нафтола.

Реализованная ИЛМ в среде системы моделирования динамических процессов, например в SIMUL8, будет являться инструментом для исследования химико-технологического объекта.

Таблица 1

Фрагмент характеристик исходного сырья и промышленных продуктов

Показатель	Обозначение
Слабощелочная реакция среды	$S_{\text{прод},1}$
Массовая концентрация бета-нафтола 243…245 г/дм^3	$S_{\text{прод},2}$
Массовая концентрация едкого натра 67…69 г/дм^3	$S_{\text{прод},3}$
Массовая концентрация разбавленного раствора серной кислоты 170…200 г/дм^3	$S_{\text{прод},4}$
Массовая доля раствора нитрита натрия 25 – 40 %	$S_{\text{прод},5}$
Массовая концентрация разбавленного раствора серной кислоты 170…200 г/дм^3	$S_{\text{прод},6}$
Прием охлажденного до 0 °С разбавленного раствора серной кислоты	$S_{\text{прод},7}$
Масса избытка серной кислоты 30…33 кг 100%-й массы серной кислоты	$S_{\text{прод},8}$
Активность водородных ионов 6,5 – 7 ед. pH	$S_{\text{прод},9}$
Массовая доля бисульфита натрия 22,5 %	$S_{\text{прод},10}$
Массовая доля раствора 80…100 г/дм^3	$S_{\text{прод},11}$
Активность водородных ионов 4,4 – 4,7 ед. pH	$S_{\text{прод},12}$
Реакция среды полученной суспензии пигмента ясно-щелочная на бриллиантовую желтую бумагу (9,0 – 9,5 ед. pH)	$S_{\text{прод},13}$
Цвет комплексного соединения – голубой	$S_{\text{прод},14}$
…	…

Таблица 2

Фрагмент базы стадий производства продуктов

Процесс	Обозначение
Растворение	$St_{\text{прод},1}$
Нитрозирование	$St_{\text{прод},2}$
Сочетание	$St_{\text{прод},3}$
…	…

Таблица 3

Фрагмент базы оборудования

Аппарат	Обозначение
Реактор для приготовления натриевой соли бета-нафтола	$Ob_{\text{прод},1}$
Реактор для нитрования бета-нафтола	$Ob_{\text{прод},2}$
Аппарат для сочетания	$Ob_{\text{прод},3}$
…	…

В данной работе предложена технология создания имитационных моделей на примере технологических процессов многоассортиментных химических производств, используя возможности применения системы SIMUL8 для оперативного управления выпуском целевой продукции. Основные стадии технологии следующие: формирование библиотеки данных технологических режимов; создание графических образов элементов технологических схем процессов, разработка имитационной модели в среде SIMUL8 [18, 19].

Реализуя предложенную технологию разработки имитационных моделей технологических процессов химических производств с использованием системы моделирования дискретных процессов SIMUL8, создана библиотека моделей производств полупродуктов и красителей, в частности: пигмента алого 2С, пигмента ярко-красного 4Ж, пигмента хромового черного О, лака ПФ-060, 3-оксихинальдин-4-карбоновой кислоты, 3-оксихинофталона, акрилила МЭК и т.д.

На рисунке 5 изображена трансляция технологической схемы для изучения производства Г-соли, а на рис. 6 представлена трансляция регламента и имитационной модели производства пигмента алого 2С.

Таким образом, создана образовательная среда по изучению технологических процессов производств органических красителей.

Рис. 5. Визуализация технологической схемы производства Г-соли

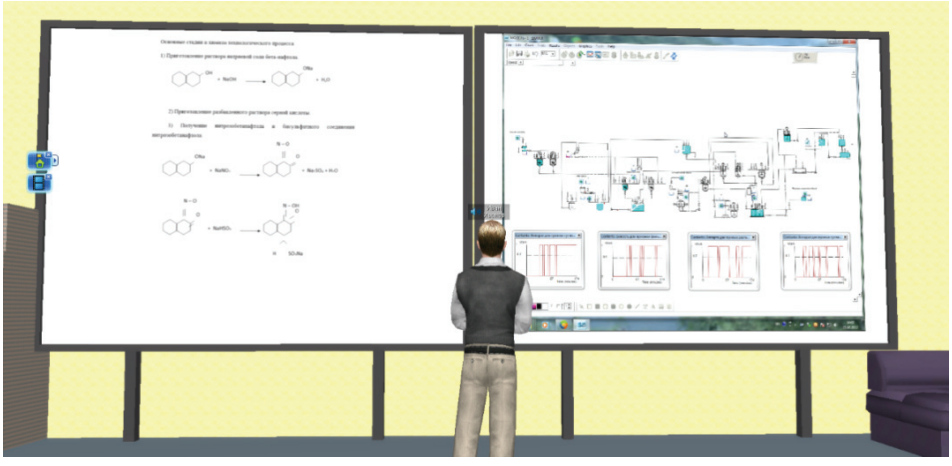


Рис. 6. Электронные доски с демонстрацией описания регламента и визуализацией выполнения имитационной модели производства пигмента алого 2С

Заключение

При проведении исследований по моделированию процессов производств органических красителей разработан прототип виртуальной технологической лаборатории, предназначенной для использования в образовательном процессе при подготовке специалистов химико-технологического профиля. При создании лаборатории использована базовая среда программирования vAcademia, а также инструменты различных систем: двух и трехмерные системы проектирования – SketchUp, AutoCAD, КОМПАС-3D; графические и видео-редакторы – Adobe Photoshop, The GIMP, Photoscape, Windows Movie Maker, SONY Vegas Pro; визуальный инструмент моделирования динамических систем SIMUL8; программное обеспечение для работы с таблицами и текстом Microsoft Office.

Виртуальная лаборатория создана в целях имитации реальной лабораторной среды и производимых в ней процессов, а также моделирования учебной среды, в которой студенты трансформируют свои теоретические знания в практические знания и навыки экспериментальным путем.

Список литературы

1. Repositories of Community Memory as Visualized Activities in 3D Virtual Worlds / M. Fominykh, E. Prasolova-Forland, L. M. Hokstad, M. Morozov // 47th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), Waikoloa, HI, USA, 6 – 9 January, 2014. – P. 678 – 687.

2. Smorkalov, A. Stream Processors Texture Generation Model for 3D Virtual Worlds: Learning Tools in vAcademia / A. Smorkalov, M. Fominykh, M. Morozov // 9th International Symposium on Multimedia (ISM), Anaheim, CA, USA, 9 – 11 December, 2013. – P. 17 – 24.

3. Smorkalov, A. Collaborative Work with Large Amount of Graphical Content in a 3D Virtual World: Evaluation of Learning Tools in vAcademia / A. Smorkalov, M. Morozov, M. Fominykh // 16th International Conference on Interactive Collaborative Learning (ICL), 25 – 27 September, 2013, Kazan. – IEEE Computer Society, 2013. – P. 303 – 312. doi: 10.1109/ICL.2013.6644587

4. Образовательный виртуальный мир vAcademia. – Текст : электронный. – URL : http://vacademia.com/wiki/doku.php (дата обращения: 24.02.2019).

5. 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

6. Разработка и использование технологий виртуальной реальности в процессах обучения / А. И. Купцов, С. А. Купцов, Р. З. Хайруллин, В. В. Богач // Вестник технологического университета. – 2016. – Т. 19, № 4. – С. 100 – 101.

7. Мокрозуб, В. Г. Графовые структуры и реляционные базы данных в автоматизированных интеллектуальных информационных системах / В. Г. Мокрозуб. – М. : Издат. дом «Спектр», 2011. – 108 с.

8. Моделирование объектов коммунальных систем / В. А. Немтинов, В. Г. Мокрозуб, П. И. Пахомов, К. В. Немтинов // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2010. – № 7 (73). – С. 35 – 39.

9. Виртуальное моделирование химико-технологических систем. Состояние проблемы : монография / В. А. Немтинов, С. В. Карпушкин, В. Г. Мокрозуб [и др.]. – Тамбов : Издат. дом ТГУ им. Г. Р. Державина, 2010. – 236 с.

10. Методы и алгоритмы создания виртуальных моделей химико-технологических схем : монография / В. А. Немтинов, С. В. Карпушкин, В. Г. Мокрозуб [и др.]. – Тамбов : Издат. дом ТГУ им. Г. Р. Державина, 2011. – 282 с.

11. Прототип виртуальной модели учебно-материальных ресурсов университета химико-технологического профиля : монография / В. А. Немтинов, С. В. Карпушкин, В. Г. Мокрозуб [и др.]. – Тамбов : Издат. дом ТГУ им. Г. Р. Державина, 2012. – 436 с.

12. Борисенко, А. Б. Иерархия задач аппаратурного оформления технологических систем многоассортиментных химических производств / А. Б. Борисенко, С. В. Карпушкин // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2014. – № 3. – С. 113 – 123. doi: 10.7868/S0002338814030044

13. Немтинов, В. А. Виртуальное моделирование объектов системы подготовки воды / В. А. Немтинов, А. В. Салущева, А. А. Бубнов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 17, № 2. – С. 445 – 448.

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

16. 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

17. Немтинов, В. А. Использование системы моделирования динамических процессов для оперативного управления промышленным производством / В. А. Немтинов, Ю. В. Немтинова // Химическая промышленность сегодня. – 2007. – № 7. – С. 43 – 48.

18. Использование интернета при информационной поддержке принятия решений по управлению промышленным предприятием / В. А. Немтинов, А. М. Манаенков, В. В. Морозов, Е. С. Егоров // Прикладная информатика. – 2010. – № 4 (28). – С. 8 – 12.

19. Немтинов, В. А. Оперативное управление выпуском продукции с использованием системы моделирования динамических процессов / В. А. Немтинов, Ю. В. Немтинова, Д. С. Русских // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2007. – Т. 13, № 2. – С. 372 – 378.

Development of a Prototype of a Virtual Technological Laboratory for the Study of the Processes of Production of Organic Dyes

V. A. Nemtinov[1], Yu. V. Nemtinova[1,2], I. M. Manaenkov[1]

Department of Computer-Integrated Systems in Automotive Engineering (1),
kafedra@mail.gaps.tstu.ru; TSTU;
Department of Management, Marketing and Advertising (2),
G. R. Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russia

Keywords: virtual laboratory; simulation modeling; organic dye production processes; prototype.

Abstract: An approach is proposed to create a prototype of a virtual technological laboratory for studying the processes of production of organic dyes in the software environment of the vAcademia system. Tools of various systems were used

to create laboratory elements: two- and three-dimensional design systems - SketchUp, AutoCAD, KOMPAS-3D; graphic and video editors - Adobe Photoshop, The GIMP, Photoscape, Windows Movie Maker, SONY Vegas Pro; visual simulation tool for dynamic systems SIMUL8; Microsoft Office spreadsheet and text software. The virtual laboratory was created in order to simulate the real laboratory environment and its processes, as well as to simulate the learning environment in which students transform their theoretical knowledge into practical knowledge and skills experimentally.

References

1. Fominykh M., Prasolova-Forland E., Hokstad L.M., Morozov M. Repositories of Community Memory as Visualized Activities in 3D Virtual Worlds, *47th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, Waikoloa, HI, USA, 6 - 9 January, 2014, pp. 678-687.

2. Smorkalov A., Fominykh M., Morozov M. Stream Processors Texture Generation Model for 3D Virtual Worlds: Learning Tools in vAcademia, *9th International Symposium on Multimedia (ISM)*, Anaheim, CA, USA, 9 - 11 December, 2013, pp. 17-24.

3. Smorkalov A., Morozov M., Fominykh M. Collaborative Work with Large Amount of Graphical Content in a 3D Virtual World: Evaluation of Learning Tools in vAcademia, *16th International Conference on Interactive Collaborative Learning (ICL)*, 25 - 27 September, 2013, Kazan, IEEE Computer Society, 2013, pp. 303-312, doi: 10.1109/ICL.2013.6644587

4. http://vacademia.com/wiki/doku.php (accessed 24 February 2019).

5. Krasnyanskiy M.N., Popov A.I., Obukhov A.D. [Mathematical modeling of the adaptive management system of vocational education], *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.)

6. Kuptsov A.I., Kuptsov S.A., Khayrullin R.Z., Bogach V.V. [Development and use of virtual reality technologies in learning processes], *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Technology University], 2016, vol. 19, no. 4, pp. 100-101. (In Russ.)

7. Mokrozub V.G. *Grafovyye struktury i relyatsionnyye bazy dannykh v avtomatizirovannykh intellektual'nykh informatsionnykh sistemakh* [Graph structures and relational databases in automated intelligent information systems], Moscow: Izdatel'skiy dom “Spektr”, 2011, 108 p. (In Russ.)

8. Nemtinov V.A., Mokrozub V.G., Pakhomov P.I., Nemtinov K.V. [Modeling of objects of communal systems], *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy* [Bulletin of computer and information technologies], 2010, no. 7 (73), pp. 35-39. (In Russ., abstract in Eng.)

9. Nemtinov V.A., Karpushkin S.V., Mokrozub V.G., Malygin Ye.N., Yegorov S.Ya., Krasnyanskiy M.N., Borisenko A.B., Nemtinova Yu.V. *Virtual'noye modelirovaniye khimiko-tekhnologicheskikh sistem. Sostoyaniye problemy: monografiya* [Virtual modeling of chemical-technological systems. State of the problem: monograph], Tambov: Izdatel'skiy dom TGU im. G. R. Derzhavina, 2010, 236 p. (In Russ.)

10. Nemtinov V.A., Karpushkin S.V., Mokrozub V.G., Malygin Ye.N., Yegorov S.Ya., Krasnyanskiy M.N., Borisenko A.B., Nemtinova Yu.V. *Metody i algoritmy sozdaniya virtual'nykh modeley khimiko-tekhnologicheskikh skhem: monografiya* [Methods and algorithms for creating virtual models of chemical-technological schemes: monograph], Tambov: Izdatel'skiy dom TGU im. G. R. Derzhavina, 2011, 282 p. (In Russ.)

11. Nemtinov V.A., Karpushkin S.V., Mokrozub V.G., Malygin Ye.N., Yegorov S.Ya., Krasnyanskiy M.N., Borisenko A.B., Nemtinova Yu.V. *Prototip virtual'noy modeli uchebno-material'nykh resursov universiteta khimiko-*

tekhnologicheskogo profilya: monografiya [The prototype of the virtual model of the educational material resources of the University of chemical and technological profile: monograph], Tambov: Izdatel'skiy dom TGU im. G. R. Derzhavina, 2012, 436 p. (In Russ., abstract in Eng.)

12. Borisenko A.B., Karpushkin S.V. [The hierarchy of tasks for the hardware design of technological systems of multi-assortment chemical production], *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Theory and control systems], 2014, no. 3, pp. 113-123, doi: 10.7868/S0002338814030044 (In Russ., abstract in Eng.)

13. Nemtinov V.A., Salushcheva A.V., Bubnov A.A. [Virtual modeling of objects of a water treatment system], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2011, vol. 17, no. 2, pp. 445-448. (In Russ., abstract in Eng.)

14. Mokrozub V.G., Malygin Ye.N., Karpushkin S.V. [Statement of the problem of developing mathematical and informational support for the design process of multi-assortment chemical productions], *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. Mokrozub V.G., Nemtinov V.A., Yegorov S.Ya. [Information-logical models of technical objects and their representation in information systems], *Informatsionnyye tekhnologii v proyektirovanii i proizvodstve* [Information technologies in design and production], 2010, no. 3, pp. 68-73. (In Russ., abstract in Eng.)

16. Mokrozub V.G., Malygin Ye.N., Karpushkin S.V. [A system analysis of decision-making processes during 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.)

17. Nemtinov V.A., Nemtinova Yu.V. [Use of a system for modeling dynamic processes for the operational management of industrial production], *Khimicheskaya promyshlennost' segodnya* [Chemical industry today], 2007, no. 7, pp. 43-48. (In Russ., abstract in Eng.)

18. Nemtinov V.A., Manayenkov A.M., Morozov V.V., Yegorov Ye.S. [Using the Internet with information support for decision-making on managing an industrial enterprise], *Prikladnaya informatika* [Applied Informatics], 2010, no. 4 (28), pp. 8-12. (In Russ.)

19. Nemtinov V.A., Nemtinova Yu.V., Russkikh D.S. [Operational management of output using a system for modeling dynamic processes], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2007, vol. 13, no. 2, pp. 372-378. (In Russ., abstract in Eng.)

Virtuelle Prototypenentwicklung des technologischen Labors für das Studium der Produktionsprozesse von organischen Farbstoffen

Zusammenfassung: Es ist ein Ansatz zur Erstellung des Prototyps des virtuellen technologischen Labors zur Untersuchung der Produktionsprozesse von organischen Farbstoffen in der Softwareumgebung des vAcademia-Systems vorgeschlagen. Zur Erstellung der Laborelemente sind Werkzeuge verschiedener Systeme verwendet: zwei- und dreidimensionale Entwurfssysteme - SketchUp, AutoCAD, KOMPAS-3D; Grafik- und Video-Editoren - Adobe Photoshop, GIMP, Photoscape, Windows Movie Maker, SONY Vegas Pro; visuelles Simulationswerkzeug für dynamische Systeme SIMUL8; Software für die Arbeit mit den Tabellen und dem Text Microsoft Office. Das virtuelle Labor wurde geschaffen, um die reale

Laborumgebung und die darin erzeugenden Prozesse zu simulieren sowie die Lernumgebung zu modellieren, in der die Schüler ihr theoretisches Wissen in praktische Kenntnisse und Fähigkeiten experimentell umwandeln.

Elaboration d'un prototype de laboratoire technologique virtuel pour l'étude des processus de la production des colorants organiques

Résumé: Est proposée une approche pour la création d'un prototype de laboratoire technologique virtuel pour l'étude des processus de la production des colorants organiques dans l'environnement logiciel du système vAcademia. Pour créer des éléments de laboratoire sont utilisés les outils de différents systèmes: systèmes de conception de deux et de trois mesures – SketchUp, AutoCAD, kompas-3D; graphiques et vidéo-éditeurs – Adobe Photoshop, The GIMP, Photoscape, Windows Movie Maker, SONY Vegas Pro, outil de modélisation de systèmes dynamiques SIMUL8; logiciel pour travailler avec des tables et un texte de Microsoft Office. Le laboratoire virtuel a été créé pour simuler un environnement de laboratoire réel et les processus qu'il produit, et pour modéliser un environnement d'apprentissage dans lequel les étudiants transforment leurs connaissances théoriques en connaissances pratiques et compétences expérimentales.

Авторы: ***Немтинов Владимир Алексеевич*** – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ»; ***Немтинова Юлия Владимировна*** – кандидат экономических наук, старший научный сотрудник кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ»; доцент кафедры менеджмента, маркетинга и рекламы, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет им. Г. Р. Державина»; ***Манаенков Иван Михайлович*** – студент, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: ***Мокрозуб Владимир Григорьевич*** – доктор технических наук, профессор, исполняющий обязанности заведующего кафедрой «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

УДК 004.8:338.2
DOI: 10.17277/vestnik.2020.01.pp.056-063

DEVELOPMENT OF A MONITORING SYSTEM FOR SCHEDULED WORKS AT DISTRIBUTED FACILITIES

H. S. Salih, S. Ya. Egorov

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

Keywords: monitoring; distributed facilities; resource distribution models.

Abstract: The article considers methods for monitoring progress of the works at distributed construction facilities, as well as for evaluating the state of the transport and technological vehicle pool. Correlations obtained in the course of the study are used in the monitoring system to coordinate scheduled works with resource distribution models. This forms a basis for developing rational methods for performing the aggregate scope of works in the generalized model.

Introduction

Contemporary trends for the implementation of important large construction projects in the Russian Federation and worldwide [1] have their peculiarities in terms of transport support of the work. Efficiency of machinery operation at large and distributed facilities, as well as within large logistic structures supporting construction of several facilities is in many ways deciding for final economic and time efficiency of construction [2]. For enterprises with available fleet of about a thousand vehicles and dozens of serviced facilities, widely spread planning methods have been long recognised inefficient [3]. Even such state-of-the-art approaches as hybrid methods for solving transportation tasks [4], high-quality information support [5], network planning methods and models [6, 7] turn out to be hardly practicable, e.g. due to severe climate conditions [8] leading to reduced technical availability of vehicles, or simply due to complicated organisation of diagnostics, scheduled or emergency maintenance of the fleet. The latter is particularly topical both for Russia, considering high depreciation of vehicles and general quality of Russian cars [3], and globally for any construction site with severe operation conditions. The latter, for instance, include Syria, where significant infrastructure projects are to be implemented in the nearest future [9]. There high temperatures and desert conditions lead to vehicle failures, even if we do not consider other evident dangers, while the distance of the recipient territory from supply sources makes the issue of decreasing counter-productive costs particularly acute. Therefore it is highly important to develop new methods for improving efficiency of transport support of large and distributed construction facilities under conditions of encumbered online diagnostics and maintenance.

The general approach to solving this type of problem is to create a mathematical or transport utilization model and its application to support decision making [10]. However, under the outlined above conditions, the implementation of the model would be extremely complicated. The general approach to solving this type of problem is to

create a mathematical or transport utilization model and its application to support decision making [10]. However, under the outlined above conditions, the implementation of the model would be extremely complicated, and it won't have the desired effect when it comes to the transport use decisions.

A multi-agent systems model (**MAS**) is commonly used to minimize the scale of the problem, among other approaches [11]. However, the intrinsic complexity of these models, on top of proving their adequacy and error determination, rules definition of agents' behavior are well known.

In the classical multi-agent system [12], the presence of indicators of the state of objects is assumed. Based on the readings of the indicators, an activity algorithm and a control method are selected.

In the given problem, the indicators are replaced by live information received from people; therefore multiple difficulties arise in decision-making [13].

Therefore, it is reasonable to apply one of the basic principles of the system analysis, the transformation of objects to systems, and consistent coordination of their goals, which will allow solving independent problems at each management level.

The definition of methods for the distribution of vehicles over construction sites in this particular way will reduce the influence of the human factor, described above, and achieve a certain increase in the efficiency of the transport use.

Organization of monitoring of scheduled works at distributed facilities

Monitoring will here mean the function of permanent observation of some item, process or phenomenon in order to identify its state and the trends of such state changes, as well as to determine its conformity to the model or initial state. The structure of the monitoring process described in scientific literature can be represented as a sequence of three major stages: setting of monitoring goals; selection of monitoring objects; forming of individual tasks.

The main objective of project implementation control (Fig. 1) is to get the planned level of profit, which is ensured by observing the set prime cost of the works, their deadlines and by minimizing additional expenses for elimination of defects [14, 16].

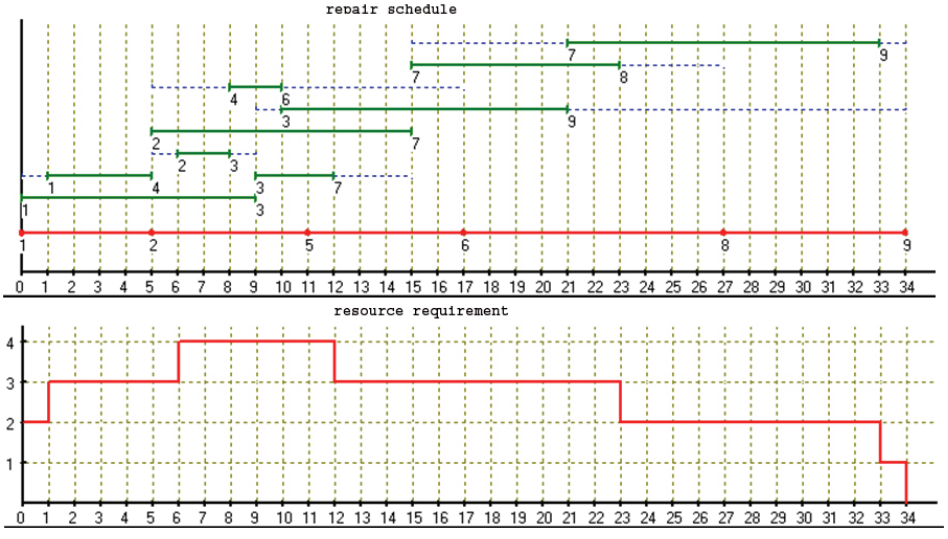


Fig. 1. Interconnection of stages of the network resource distribution model

In general the deviation from planned direct costs in month *i* with respect to work *j* can be calculated as follows

$$\Delta_{i,j} = \sum_{k=1}^{p} C_{ij}^{k}(q_{ij}^{k} - \overline{q}_{j}^{k}) + \lambda_{ij}, \quad (1)$$

where q_{ij}^{k} is actual consumption of resource *k* (equipment, materials, labour) in month *i*; $\overline{q}_{ij}^{k}$ is actual consumption of resource *k* provided for at the time of contract conclusion (with respect to the work scope performed in month *i*); C_{ij}^{k} is price (rate) of resource *k* in month *i*; λ_{ij} is expenses for eliminating defects in work *j* per month *i*.

Total deviation Δ for the project makes $\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\Delta_{ij} \pm S$, where *m* is total duration (months) of construction and installation works, n is the quantity of works performed with own resources (if work *j* is not carried out in month *i*, $\Delta_{i,j} = 0$); *S* is the bonus for ahead-of-schedule facility completion (or penalty for delayed construction). In the context of inflation it is expedient to calculate deviations $\Delta_{i,j}$ in comparable prices.

According to the western practice, main responsibility for the contract budget is borne by the project manager [15]. Besides, they have all necessary powers (technical procurement for the construction site, including lease of equipment, purchase of materials and structures, hiring of labour, selection of subcontractors). Project manager together with his/her team (section managers – foremen, estimators) continuously (daily in certain cases) monitors the works progress and resources consumption. In case of significant deviations he/she takes immediate active organizational and technical measures (if central office assistance is required, project manager acts in contact with the contract department director) [16]. In the west, staying within the contract budget and works deadlines are the major criteria of the project manager's success. It is necessary to mention that the manager always participates in preparing the tender bid (programme and deadlines, unit prices) and is therefore jointly (with the planning and cost estimate department) liable for the planned contract budget.

Competitive ability of a company largely depends on the prime cost of construction and installation works as compared with the branch average level. Thus, it is recommended to use the following correlation as a basis for comparative analysis of unit prime cost of the work (direct expenses)

$$\Delta = \left(\sum_{i=1}^{m} q_i c_i - \sum_{i=1}^{m} q_i^0 c_i^0\right) \Big/ \sum_{i=1}^{m} q_i^0 c_i^0, \quad (2)$$

where q_i and q_i^0 are individual and branch average resource consumption rates for the type of construction and installation works under consideration respectively, while c_i and c_i^0 is individual and normative budget prices (rates).

Calculation according to correlation (2) demonstrates by how many percent individual prime cost of the works is higher (lower) than the branch average one. For a more profound comparative analysis it is necessary to understand the reasons for deviation of individual prime cost from the average level. With this view it is proposed to use the following criterion

$$\Delta = \Delta_{eq} + \Delta_{m} + \Delta_{s}. \quad (3)$$

Deviation in terms of expenses for equipment (including energy resources consumption and operators' wages) makes

$$\Delta_{\text{eq}} = 100\left(\sum_{i=1}^{m_1} q_i c_i - \sum_{i=1}^{m_1} q_i^0 c_i^0\right) \Big/ \sum_{i=1}^{m} q_i c_i \ . \tag{4}$$

Deviation in terms of expenses for materials and structures makes

$$\Delta_{\text{m}} = 100\left(\sum_{i=m_1+1}^{m_2} q_i c_i - \sum_{i=m_1+1}^{m_2} q_i^0 c_i^0\right) \Big/ \sum_{i=1}^{m} q_i c_i \ . \tag{5}$$

Deviation in terms of workers' wages makes

$$\Delta_{\text{s}} = 100\left(\sum_{i=m_2+1}^{m} q_i c_i - \sum_{i=m_2+1}^{m} q_i^0 c_i^0\right) \Big/ \sum_{i=1}^{m} q_i c_i \ . \tag{6}$$

Values Δ_{eq}, Δ_{m} and Δ_{s} show the impact of deviations in terms of expenses for equipment, materials and wages on the total prime cost deviation. In their turn they can be decomposed into two components: resource one and price one. Thus,

$$\Delta_{\text{eq}} = \left(\sum_{i=1}^{m_1} q_i c_i^0 - \sum_{i=1}^{m_1} q_i^0 c_i^0\right) + \left(\sum_{i=1}^{m_1} q_i c_i - \sum_{i=1}^{m_1} q_i c_i^0\right) = \Delta_{\text{eq}}^{\text{r}} + \Delta_{\text{eq}}^{\text{w}}. \tag{7}$$

Similarly:

$$\Delta_{\text{m}} = \Delta_{\text{m}}^{\text{p}} + \Delta_{\text{m}}^{\text{w}}, \ \ \Delta_{\text{w}} = \Delta_{\text{w}}^{\text{r}} + \Delta_{\text{s}}^{\text{w}} . \tag{8}$$

Calculation of values Δ_{eq}, Δ_{m} and Δ_{s}, as well as their decomposition into resource and price components allows to draw up the guidance for improving competitive ability of the company's unit rates.

If $\Delta_{\text{eq}} > 0$, at $\Delta_{\text{eq}}^{\text{r}} < 0$, it is an evidence of technical underdevelopment and the necessity to upgrade equipment.

If $\Delta_{\text{eq}} > 0$, at $\Delta_{\text{eq}}^{\text{r}} \geq 0$, it means that machinery is not rationally used.

If $\Delta_{\text{eq}}^{\text{w}} \geq 0$, it means that materials and structures are used inefficiently, which can be caused by low level of labour management, lax control of material consumption, outdated technical facilities.

When $\Delta_{\text{eq}}^{\text{w}} < 0$, it is possible to speak about irrational procurement policy [17].

Correlation $\Delta_{\text{s}} > 0$, $\Delta_{\text{s}}^{\text{w}} < 0$ testifies low qualification of workers, accounting for labour intensity of construction and installation works.

Correlation $\Delta_{\text{s}} > 0$, $\Delta_{\text{s}}^{\text{w}} \geq 0$ means bad labour management and an inefficient remuneration system.

Thus, the purpose of comparative analysis of direct expenses for construction and installation works is to develop a system of organizational, economic and technical measures aimed at reducing the prime cost and its components. The impact of such measures can be followed by the dynamics of values Δ, Δ_{eq}, Δ_{m} and Δ_{s}.

A considerable role in forming prime cost of construction and installation works is played by overheads. New cost estimation norms imply determining differentiated standards of overheads for different types of construction and installation works (per

one rouble of main workers' wages). These standards can also be used for comparative analysis of overheads level. In such case it is recommended to calculate the deviation from the "normal" level as follows

$$\Delta h = Hf - \sum_{i=1}^{n} H_i^0 A_i \ , \tag{9}$$

where Hf is actual overheads of the company (absolute value); H_i^0 is branch average standards of overheads for construction and installation works type i performed by the company; A_i is wages of main workers engaged in performance of work type i.

If $\Delta h > 0$, the company is overspending for overheads, and individual standards (for all types of work) shall be increased in comparison with the branch average standards proportionately to the value of $\gamma_h = Hf \Big/ \sum_{i=1}^{n} H_i^0 A_i$, which has to be considered in comparative analysis of full prime cost of works.

Conclusion

If overspending for overheads is covered by general saving on direct expenses, it is possible to say that the company management system is efficient enough and additional overheads are principally reasonable, though their potential decrease cannot be excluded. If overspending for overheads is accompanied by overspending for direct expenses (or saving on direct expenses is low), it is an evidence of a clearly irrational organization and management structure of the company and the need for its reorganization.

References

1. https://ria.ru/ 20191219/1562599225.html (accessed 11 February 2020).
2. Anisimov A.P. *Ekonomika, planirovaniye i analiz deyatel'nosti avtotransportnykh predpriyatiy* [Economics, planning and analysis of the activities of motor transport enterprises], Moscow: Transport, 1998, 245 p. (In Russ.)
3. Soldatova L.I., Ivanova O.Ye. [The current state and prospects for the development of freight vehicles in Russia], *Natsional'nyye interesy: prioritety i bezopasnost'* [National interests: priorities and security], 2012, vol. 8, no. 1 (142), pp. 22-31. (In Russ.)
4. Gladkov L.A., Gladkova N. V. [Hybrid algorithm for solving dynamic transport problems], *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskiye nauki* [Bulletin of the Southern Federal University. Technical science], 2016, no. 6 (179), pp. 34-45. (In Russ., abstract in Eng.)
5. Costin A., Adibfar A., Hu H., Chen S.S. Building Information Modeling (BIM) for Transportation Infrastructure – Literature Review, Applications, Challenges, and Recommendations, *Automation in Construction*, 2018, vol. 94, pp. 257-281.
6. Geronimus B.L. *Ekonomiko-matematicheskiye metody v planirovanii na avtomobil'nom transporte* [Economic and mathematical methods in planning on automobile transport], Moscow: Transport, 1982, 192 p. (In Russ.)
7. Seliverstov S., Seliverstov Yu. Developing Principles for Building Transport Networks of Conflict-Free Continuous Traffic, *Transportation Research Procedia*, 2018, vol. 36, pp. 689-699.
8. Ruparathna R., Hewage K., Sadiq R. Multi-Period Maintenance Planning for Public Buildings: A Risk Based Approach for Climate Conscious Operation, *Journal of Cleaner Production*, 2018, vol. 170, pp. 1338-1353.

9. https://tass.ru/politika/7362351 (accessed 11 February 2020).

10. Vinnik A.I., Makarenko N.G., Smirnov A.M., Shargayov A.A. [Algorithm for the transition to an integrated system of maintenance and repair], *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2016, vol. 18, no 1 (2), pp. 161-165. (In Russ., abstract in Eng.)

11. Tchappi I.H., Galland S., Kamla V.C., Kamgang J.C. A Brief Review of Holonic Multi-Agent Models for Traffic and Transportation Systems, *Procedia Computer Science*, 2018, vol. 134, pp. 137-144.

12. Bugakova T.Yu., Solov'yeva T.A. [Analysis of the possibility of using multi-agent technologies in problems of determining the state of objects from geospatial data], *Interekspo Geo-Sibir'* [Interexpo Geo-Siberia], 2017, vol. 9, no. 2, pp. 37-42. (In Russ., abstract in Eng.)

13. Moiseyeva T.V., Polyayeva N.Yu. [Infocommunication support of the interaction of actors in the theory of intersubjective management], *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki* [Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical science], 2018, vol. 45, no. 2, pp. 158-170, doi: 10.21822/2073-6185-2018-45-2-158-170 (In Russ., abstract in Eng.)

14. Gusev A.G. *PhD Dissertation* (*Economics*), Moscow, 2011, 192 p. (In Russ.)

15. Iskoskov M.O., Rudenko A.A., Danilova S.Yu. [Analysis of scientific approaches to the management of production systems at enterprises], *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2014, vol. 16, no. 1 (7), pp. 1845-1848. (In Russ., abstract in Eng.)

16. Ivanov D.A. *Upravleniye tsepyami postavok* [Supply Chain Management], St. Petersburg: Izdatel'stvo Politekhnicheskogo universiteta, 2009, 659 p. (In Russ.)

17. Yelovoy I.A., Lebedeva I.A. *Integrirovannyye logisticheskiye sistemy dostavki resursov: (teoriya, metodologiya, organizatsiya)* [Integrated logistic systems of resource delivery: (theory, methodology, organization)], Minsk: Pravo i ekonomika, 2011, 460 p. (In Russ.)

Построение системы мониторинга выполнения плановых работ на распределенных объектах

Х. С. Салих, С. Я. Егоров

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

Ключевые слова: модели распределения ресурсов; мониторинг; распределенные объекты.

Аннотация: Рассмотрены средства мониторинга хода выполнения работ на распределенных объектах строительства, а также оценки состояния парка транспортных и технологических машин. Полученные в работе соотношения используются в системе мониторинга для согласования плановых работ с моделями распределения ресурсов, что в рамках обобщенной модели дает основу формирования рациональных механизмов выполнения общей совокупности работ.

Список литературы

1. Путин отметил важность строительства моста через Обь в ЯНАО : большая пресс-конференция Владимира Путина // РИА Новости. – URL : https://ria.ru/20191219/1562599225.html (дата обращения: 11.02.2020).
2. Анисимов, А. П. Экономика, планирование и анализ деятельности автотранспортных предприятий / А. П. Анисимов. – М. : Транспорт, 1998. – 245 с.
3. Солдатова, Л. И. Современное состояние и перспективы развития работы грузового автотранспорта в России / Л. И. Солдатова, О. Е. Иванова // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2012. – Т. 8, № 1 (142). – С. 22 – 31.
4. Гладков, Л. А. Гибридный алгоритм решения динамических транспортных задач / Л. А. Гладков, Н. В. Гладкова // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 6 (179). – С. 34 – 45.
5. Building Information Modeling (BIM) for Transportation Infrastructure – Literature Review, Applications, Challenges, and Recommendations / A. Costin [et al.] // Automation in Construction. – 2018. – Vol. 94. – P. 257 – 281.
6. Геронимус, Б. Л. Экономико-математические методы в планировании на автомобильном транспорте / Б. Л. Геронимус. – М. : Транспорт, 1982. – 192 с.
7. Seliverstov, S. Developing Principles for Building Transport Networks of Conflict-Free Continuous Traffic / S. Seliverstov, Yu. Seliverstov // Transportation Research Procedia. – 2018. – Vol. 36. – P. 689 – 699.
8. Ruparathna, R. Multi-Period Maintenance Planning for Public Buildings: A Risk Based Approach for Climate Conscious Operation / R. Ruparathna, K. Hewage, R. Sadiq // Journal of Cleaner Production. – 2018. – Vol. 170. – P. 1338 – 1353.
9. Россия в 2019 году выделит около $17 млн структурам ООН на восстановление Сирии // ТАСС. – URL : https://tass.ru/politika/7362351 (дата обращения: 11.02.2020).
10. Алгоритм перехода к комплексной системе технического обслуживания и ремонта / А. И. Винник [и др.] // Известия Самарского науч. центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18, № 1 (2). – С. 161 – 165.
11. A Brief Review of Holonic Multi-Agent Models for Traffic and Transportation Systems / I. H. Tchappi [et al.] // Procedia Computer Science. – 2018. – Vol. 134. – P. 137 – 144.
12. Бугакова, Т. Ю. Анализ возможности использования мультиагентных технологий в задачах определения состояний объектов по геопространственным данным / Т. Ю. Бугакова, Т. А. Соловьева // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2017. – Т. 9, № 2. – С. 37 – 42.
13. Моисеева, Т. В. Инфокоммуникационная поддержка взаимодействия акторов в теории интерсубъективного управления / Т. В. Моисеева, Н. Ю. Полякова // Вестн. Дагестанского гос. техн. ун-та. Технические науки. – 2018. – Т. 45, № 2. – С. 158 – 170. doi: 10.21822/2073-6185-2018-45-2-158-170
14. Гусев, А. Г. Инновационное развитие системы управления поставками ресурсов : дис. ... канд. экон. наук : 08.00.05 / Гусев Александр Григорьевич. – М., 2011. – 192 с.
15. Искосков, М. О. Анализ научных подходов по управлению производственными системами на предприятиях / М. О. Искосков, А. А. Руденко, С. Ю. Данилова // Известия Самарского науч. центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16, № 1 (7). – С. 1845 – 1848.
16. Иванов, Д. А. Управление цепями поставок / Д. А. Иванов. – СПб. : Изд-во Политехнического университета, 2009. – 659 с.
17. Еловой, И. А. Интегрированные логистические системы доставки ресурсов: (теория, методология, организация) / И. А. Еловой, И. А. Лебедева. – Минск : Право и экономика, 2011. – 460 с.

Aufbau eines Überwachungssystems für geplante Arbeiten auf verteilten Objekten

Zusammenfassung: Es sind die Mittel der Überwachung des Fortschritts der Arbeit auf verteilten Bauobjekten sowie der Bewertung des Zustandes des Fuhrparks von Transport-und technologischen Maschinen betrachtet. Die in der Arbeit erhaltenen Verhältnisse werden im Überwachungssystem verwendet, um die geplanten Arbeiten mit den Modellen der Ressourcenverteilung zu koordinieren, was im Rahmen des generalisierten Modells die Grundlage für die Bildung von rationalen Mechanismen der Ausführung der Gesamtheit der Arbeiten bildet.

Construction d'un système de surveillance de l'exécution des travaux planifiés sur les sites distribués

Résumé: Sont examinés les moyens de surveillance de l'avancement des travaux sur les objets de construction distribués ainsi que l'évaluation de l'état du parc de véhicules et de machines technologiques. Les ratios obtenus sont utilisés dans le système de surveillance pour aligner les travaux planifiés sur les mécanismes d'allocation des ressources, ce qui, dans le cadre d'un modèle généralisé, constitue la base de la formation des mécanismes rationnels pour l'exécution de l'ensemble des travaux.

Авторы: ***Салих Хайдер Сабах*** – аспирант кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; ***Егоров Сергей Яковлевич*** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: ***Мокрозуб Владимир Григорьевич*** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

УДК 004.896
DOI: 10.17277/vestnik.2020.01.pp.064-078

ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ФИНАНСОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ

Д. В. Поляков[1], А. И. Попов[2]

Кафедры: «Информационные системы и защита информации» (1), «Техника и технологии производства нанопродуктов» (2), dimadress@yandex.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия

Ключевые слова: искусственный интеллект; теория нечетких множеств; управление деятельностью; цифровизация экономики.

Аннотация: Обоснована необходимость формализации механизма принятия управленческих решений для использования в программных средствах и целесообразность использования теории нечетких множеств для построения систем искусственного интеллекта. Показано применение теории нечетких множеств для разработки механизма оценки привлекательности инвестиционного проекта. Дано описание модели принятия решения о приобретении финансовых активов.

Цифровизация экономики предполагает активное внедрение информационных технологий как при производстве продукции, так и на различных этапах управления деятельностью хозяйствующих субъектов. В контексте разработки систем искусственного интеллекта представляет актуальность разработка процедур анализа информации, определяющей ключевые параметры экономических процессов, и, прежде всего, связанных со значительными финансовыми потоками.

Анализ функционирования сложных экономических систем невозможно себе представить без экспертов. Например, их опыт позволяет довольно точно предсказывать выгодную стратегию поведения на финансовых рынках или подготовить обоснованное и экономически выгодное управленческое решение, определяющее стратегию поведения предприятия [1 – 4]. Разработка механизма агрегирования данного опыта и его формализации для использования в программных средствах является актуальной задачей.

Теория нечетких множеств является тем самым методом построения искусственного интеллекта, который позволяет формализовать человеческую логику и, по сути, научить вычислительное устройство оперировать человеческими категориями, посредством специализированного программного обеспечения [5].

Рассмотрим применение теории нечетких множеств для разработки механизма оценки привлекательности инвестиционного проекта. Пусть есть n активов, которые можно купить или продать. Покупка означает инвестирование в актив, а продажа – вывод средств. Множество $A = \{a_1, a_2, ..., a_n\}$ задает цену для единицы (или размера минимальной покупки) каждого актива, а именно a_i – цена покупки i-го актива, $\forall i = \overline{1, n},\ a_i \in N_0$, где $N_0 = N \cup \{0\} = \{0, 1, 2, 3, ...\}$. Цену, в рамках предлагаемой модели, будем рассматривать как неотрицательное целое число в некоторых условных единицах. Кроме множества A введем еще множество $B = \{b_1, b_2, ..., b_n\}$, аналогичным образом задающее стоимость продажи каждого

актива. В частном случае A может быть равно B, вместе с тем, при торговле на специализированных платформах из-за кредитного плеча и маржи рассматриваемые множества могут не совпадать. Очевидно, что значения a_i и b_i , $\forall i = \overline{1, n}$, будут различаться, на этом собственно и строится возможность заработать, инвестируя в тот или иной актив. Однако, в силу того, что вид кривых $a_i(t)$ и $b_i(t)$, где t – время, неизвестен, и в рамках предлагаемой модели задача построения данных кривых не актуальна, будем рассматривать дискретную ситуацию, при которой в каждый фиксированный момент времени принятия решения о покупке или продаже актива, цены, заданные множествами A и B – фиксированы. Также введем в рассмотрение множество $C = \{c_1, c_2, ..., c_n\}$, где c_i – волатильность i-го актива $\forall i = \overline{1, n},\ a_i \in R$.

Прежде чем осуществить дальнейшие построения, уточним, что предлагаемая модель не несет в себе задачу разработки новых более эффективных торговых роботов, так как является крайне обобщенной. Данная работа создана с целью предложить подход к формализации торговых алгоритмов, основанных на мнениях экспертов, посредством теории нечетких множеств. В работе не рассматриваются вопросы, связанные с тем, как строятся мнения экспертов и кто является экспертами. Так, в качестве экспертов могут выступать сами торговые роботы. Также не рассматриваются вопросы разработки торговых алгоритмов, которые связаны с конкретной торговой площадкой, типом активов, условиями инвестирования, а также экономической теорией.

Зададим ряд лингвистических переменных, формализующих интересующие нас характеристики активов, экспертов и их мнений и построим на их основе подход к формализации торговых алгоритмов посредством нечеткой логики.

Пусть X – некоторая произвольная лингвистическая переменная, тогда в соответствии с классическим подходом [6] X имеет вид

$$X = \langle x, T_x, C_x, G_x, M_x \rangle, \tag{1}$$

где x – имя лингвистической переменной X; T_x – терм-множество значений X, то есть множество базовых значений лингвистической переменной; G_x – множество синтаксических правил, порождающих новые (не базовые) значения лингвистической переменной X и состоящих из синтаксических связок Sv_x и модификаторов Mod_x, то есть $G_x = Sv_x \cup Mod_x$; C_x – область определения функций принадлежности, формализующих значения лингвистических переменных; M_x – множество правил, задающих как вид функций принадлежности, формализующих значения лингвистической переменной, представленные в терм-множестве, так и семантику для новых, порожденных посредством G_x , значений.

Отметим ряд важных моментов при построении лингвистических переменных.

1. Каждому терму из множества T_x ставится в соответствие некоторая функция принадлежности из M_x , задавая, таким образом, семантику данного терма.

2. Каждому модификатору или синтаксической связке из G_x ставится в соответствие унарное или бинарное преобразование из M_x соответственно.

3. Синтаксические связки «и» и «или», а также модификатор «не», являются классическими для всех лингвистических переменных. Они формализуются посредством норм, конорм и операции отрицания соответственно. Существует множество видов данных операций [7], конкретный вид операции выбирается из соображений адекватности модели. На этапе разработки модели норма, конорма

и операция отрицания классически обозначаются как $T(x,y)$, $S(x,y)$ и $n(x)$ соответственно, где $x, y \in C_x$.

4. При построении T_x в основном используются три терма, которые можно условно обозначить как «маленькое», «среднее» и «большое» значения величины, формализуемой лингвистической переменной. Прочие значения лингвистических переменных строятся на основе данных посредством модификаторов. Например, модификатор «очень», позволяет построить значения «очень маленькое» или «очень большое», а модификатор «не» добавить к данным вариантам такие значения лингвистической переменной как «не маленькое» или «не очень большое». Семантику значений «маленькое» и «большое» удобно задавать функциями вида:

$$\mu_{\text{маленькое}}(x) = \min\{1, \max\{0, f(x)\}\} \forall x \in C_x, \tag{2}$$

где $f(x)\downarrow$ на C_x;

$$\mu_{\text{большое}}(x) = \min\{1, \max\{0, g(x)\}\} \forall x \in C_x, \tag{3}$$

где $g(x)\uparrow$ на C_x.

Таким образом, для задания функций принадлежности, формализующих значения лингвистической переменной из терм-множества, условно обозначенные как «маленькое» и «большое» в виде (2) и (3), достаточно задать $f(x)\downarrow$ на C_x и $g(x)\uparrow$ на C_x.

5. Значение лингвистической переменной из терм-множества T_x, условно обозначенное как «среднее», с семантической точки зрения близко к понятию «не большое и не малое». А семантику данного значения легко построить, используя функции (2) и (3), а также норму и операцию отрицания. Тогда

$$\mu_{\text{среднее}}(x) = T(n(\mu_{\text{большое}}(x)), n(\mu_{\text{маленькое}}(x))) \forall x \in C_x. \tag{4}$$

Таким образом, достаточно задать вид функций $f(x)$ и $g(x)$, а также нормы и операцию отрицания, чтобы посредством (2) – (4) построить функции принадлежности, формализующие значения терм-множества T_x.

Отметим, что норма, конорма и операция отрицания выбираются одинаковыми для всех лингвистических переменных в рамках модели, так как соответствующие им синтаксические связки и модификатор применяются не только к элементам терм-множества в рамках построения значения одной лингвистической переменной, но и к нескольким лингвистическим переменным для формирования правил. Поэтому для задания функций принадлежности конкретной лингвистической переменной удобно ограничиться заданием $f(x)$ и $g(x)$, тогда как непосредственно сами функции уже строятся на основе (2) – (4).

Моменты, определенные в пунктах 1 – 5, позволяют задать лингвистическую переменную в виде таблицы. Примером послужит лингвистическая переменная *V* «волатильность», заданная посредством табл. 1.

Зададим для примера норму, конорму и операцию отрицания

$$\begin{cases} T(x,y) = xy, \\ S(x,y) = x + y - xy, \\ n(x) = 1 - x. \end{cases} \tag{5}$$

Норма и конорма, предложенные в (5), называются вероятностными и довольно широко используются, а операция отрицания из (5) является классической и наиболее часто используемой в нечеткой логике.

Таблица 1

Лингвистическая переменная *V*

Наименование элемента	Значение элемента
T_V	{«низкая», «средняя», «высокая»}
C_V	R – множество действительных чисел
$f_V(x)$	$2{,}1 - 11x$
$g_V(x)$	$0{,}5x - 1$
G_V	M_V
«очень»	x^2
«крайне»	x^3

Отметим, что каждое значение лингвистической переменной задает нечеткое подмножество C_x, которое в свою очередь определяется некоторой функцией принадлежности. Рассмотрим, в качестве примера, подробнее синтаксис и семантику нескольких значений переменной V.

1. $V =$ низкая. В этом случае в силу (2) и данных из табл. 1 строим функцию принадлежности

$$\mu_{\text{низкая}}(x) = \min\{1, \max\{0, 2{,}1 - 11x\}\} \; \forall x \in R. \tag{6}$$

График $\mu_{\text{низкая}}(x)$ изображен на рис. 1, *а*.

2. $V =$ высокая. В этом случае в силу (3) и данных из табл. 1 строим функцию принадлежности

$$\mu_{\text{высокая}}(x) = \min\{1, \max\{0, 0{,}5x - 1\}\} \; \forall x \in R. \tag{7}$$

График $\mu_{\text{высокая}}(x)$ изображен на рис. 1, *б*.

3. $V =$ средняя. Для построения функции принадлежности, формализующее значение лингвистической переменной «средняя» воспользуемся выражением (4), а также формализациями нормы и операции отрицания из (5). Тогда искомая функция принадлежности имеет вид

$$\mu_{\text{средняя}}(x) = (1 - \mu_{\text{высокая}}(x))(1 - \mu_{\text{низкая}}(x)), \tag{8}$$

где $\mu_{\text{высокая}}(x)$ и $\mu_{\text{низкая}}(x)$ вычисляются по формулам (6) – (7). График $\mu_{\text{средняя}}(x)$ изображен на рис. 1, *в*.

Отметим, что построение (8) уже предполагает формализацию семантики значения, созданного с использованием модификатора «не» и связки «и», так как было допущено, что семантика значения «среднее» эквивалентно семантике значения «не большое и не малое».

4. $V =$ крайне средняя. Данное значение сконструировано из значения «среднее» посредством модификатора «крайне». Следовательно, функция принадлежности, задающая семантику «крайне средняя», создается из $\mu_{\text{средняя}}(x)$, путем применения к ней правила из M_x, соответствующего модификатору «среднее». Согласно табл. 1, данное правило представляет собой возведение в куб. Тогда функция принадлежности, формализующая значение лингвистической переменной «крайне средняя», имеет вид

$$\mu_{\text{крайне средняя}}(x) = (1 - \mu_{\text{высокая}}(x))^3 (1 - \mu_{\text{низкая}}(x))^3, \quad (9)$$

где $\mu_{\text{высокая}}(x)$ и $\mu_{\text{низкая}}(x)$ вычисляются по формулам (6) – (7), а ее график представлен на рис. 1, *г*.

5. $V =$ не очень высокая. Здесь рассматривается пример значения лингвистической переменной, сформированного двойным последовательным применением модификаторов «не» и «очень». Соответствующая функция принадлежности строится на основе последовательного применения соответствующим данным модификаторам правил к $\mu_{\text{высокая}}(x)$. Тогда, согласно (7), (5) и табл. 1, искомая функция принадлежности будет иметь вид

$$\mu_{\text{не очень высокая}}(x) = (1 - \mu_{\text{высокая}}(x))^2, \quad (10)$$

где $\mu_{\text{высокая}}(x)$ задано выражением (7). На рисунке 1, *д*, представлен график функции (10).

Отметим, что порядок применения модификаторов также крайне важен. В качестве иллюстрации на рис. 1, *е*, изображен график функции принадлежности, формализующий значение «очень не высокая» лингвистической переменной *V*.

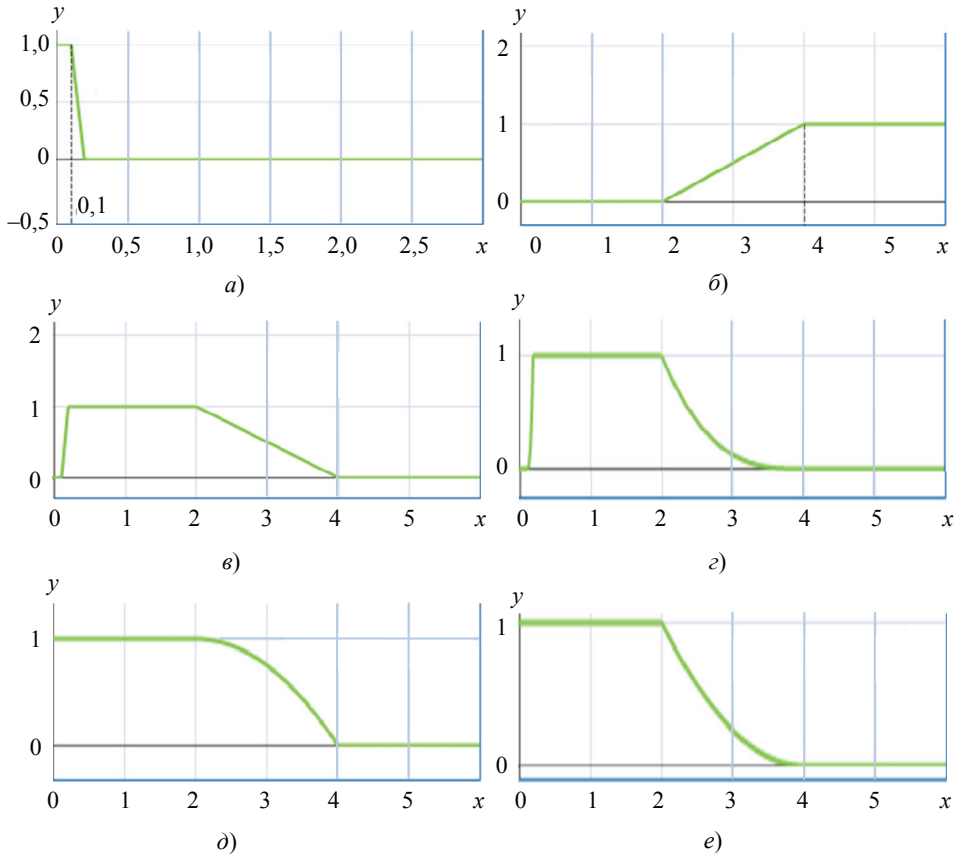


Рис. 1. Графики функций принадлежности значений «низкая» (*а*), «высокая» (*б*), «средняя» (*в*), «крайне средняя» (*г*), «не очень высокая» (*д*), «очень не высокая» (*е*) лингвистической переменной *V*

Каждое значение лингвистической переменной задает нечеткое множество, являющееся подмножеством C_x, в общем случае и, согласно табл. 1, подмножеством R в случае рассматриваемого примера с волатильностью V. Так, например, значение «не очень высокая» задает нечеткое подмножество $\widetilde{M}_{\text{не очень высокая}} \in R$, формализованное функцией принадлежности (10).

Пусть волатильность c_i некоторого актива $i = \overline{1, n}$ измерена. В таблице 2 представлен расчет по формулам (6) – (10) степеней принадлежности нескольких примеров значений волатильности к рассмотренным ранее значениям лингвистической переменной. Каждый столбец в своем заголовке имеет конкретное значение волатильности, и ниже рассчитаны степени принадлежности к нечетким множествам, заданным различными значениями лингвистической переменной. Например, из шестого столбца видно, что волатильность 2,5 принадлежит к нечеткому множеству «низких волатильностей» ($\widetilde{M}_{\text{низкая}} \in R$) со степенью принадлежности 0, то есть другими словами: 2,5 не принадлежит множеству $\widetilde{M}_{\text{низкая}}$ или можно сказать, что 2,5 не является низкой волатильностью, но все остальные значения в шестом столбце табл. 2 не нулевые. Таким образом, волатильность 2,5, согласно предложенной модели, является одновременно и «высокой», и «средней», и «крайне средней», и «не очень высокой», то есть 2,5 одновременно принадлежит множествам $\widetilde{M}_{\text{высокая}}, \widetilde{M}_{\text{средняя}}, \widetilde{M}_{\text{крайне средняя}}, \widetilde{M}_{\text{не очень высокая}} \in R.$ Вместе с тем 2,5 принадлежит данным множествам не в равной степени. Если бы модель строилась в рамках классической теории множеств, все значения функций принадлежности μ были бы 0 и 1: значение, равное 0, означало бы, что 2,5 не принадлежит некоторому множеству, а 1 – напротив, принадлежит. Теория нечетких множеств позволяет построить более гибкую модель, так как можно судить не только о принадлежности элемента множеству, но и о степени этой принадлежности, то есть ответить на вопрос: насколько данное значение волатильности является большим или средним? Например, тот факт, что $\mu_{\text{высокая}}(2{,}5) = 0{,}25$, а $\mu_{\text{средняя}}(2{,}5) = 0{,}75$, говорит о том, что 0,25 «в большей степени средняя волатильность, чем высокая», а $\mu_{\text{не очень высокая}}(2{,}5) = 0{,}938$ означает, что 0,25 «скорее не очень высокая волатильность, чем средняя».

Таблица 2

Примеры степеней принадлежности к значениям лингвистической переменной V

Функция принадлежности c_i	Пример волатильности								
	0,050	0,100	0,150	2,000	2,500	3,000	3,500	4,000	4,500
$\mu_{\text{низкая}}(c_i)$	1,000	1,000	0,450	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
$\mu_{\text{высокая}}(c_i)$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,250	0,500	0,750	1,000	1,000
$\mu_{\text{средняя}}(c_i)$	0,000	0,000	0,550	1,000	0,750	0,500	0,250	0,000	0,000
$\mu_{\text{крайне средняя}}(c_i)$	0,000	0,000	0,166	1,000	0,422	0,125	0,016	0,000	0,000
$\mu_{\text{не очень высокая}}(c_i)$	1,000	1,000	1,000	1,000	0,938	0,750	0,438	0,000	0,000

Такая ситуация с конкретными значениями волатильности имеет место только при заданных в системе (5) норме, конорме и операции отрицания, а также в виде функций из табл. 1.

Таким образом, теория нечетких множеств позволяет на основе собранных данных оперировать логикой в естественных для человека терминах и семантике, применяя при этом строгий математический аппарат.

Заметим, что в табл. 2 приведены только функции принадлежности рассмотренных в качестве примеров значений лингвистической переменной. Вместе с тем возможных значений V гораздо больше. Они формулируются посредством терм-множества T_V и модификаторов G_V. После чего на основе $f_V(x)$, $g_V(x)$ и M_V строятся соответствующие данным значениям лингвистической переменной функции принадлежности.

Рассмотрим задачу формализации экспертного мнения. Сигналом s назовем высказывание эксперта, которое можно формально представить в виде кортежа

$$s = \langle k, b, t, \Delta t, \mu \rangle, \tag{11}$$

где $k \in N$ – номер актива; $b \in B = \{0, 1\}$ – число, задающее мнение эксперта относительно k-го актива, а именно, если $b = 0$, это означает, что эксперт рекомендует не покупать k-й актив, в противном случае, при $b = 1$, сигнал означает, что эксперт рекомендует приобрести k-й актив; $t \in N$ – момент времени, в который сделан прогноз; Δt – временной интервал, на котором, по мнению эксперта, будет рост стоимости актива или не будет, в случае если $b = 0$; $\mu \in [0, 1]$ – степень принадлежности эксперта к множеству доверенных экспертов ($\widetilde{D} \subset U$, где U – множество всех возможных экспертов), которую можно оценить например как долю верных прогнозов, сделанных экспертом или на основе опыта и результатов его прошлых инвестиций.

Отметим, что экономическая система зачастую предлагает возможность заработать как на росте цены актива, так и на ее падении. Примером может служить так называемая «игра на понижение» или торговля валютными парами. В рамках рассматриваемой модели заработок на росте цены реального актива и на ее падении рассматривается как покупка разных активов. В качестве примера удобно рассмотреть торговлю валютными парами. Рассмотрим, например, пару AUD/JPY, она задает поведение австралийского доллара относительно японской иены. Торговые платформы предлагают купить или продать пару AUD/JPY, что, по сути, означает сделать ставку на то, что австралийский доллар будет расти по отношению к иене и наоборот соответственно. Если предлагаемую модель применить к данной задаче, то покупка и продажа пары AUD/JPY будут формализованы как покупка двух разных активов.

Таким образом, сигнал с $b = 0$ не означает, что цена актива будет падать. Это означает, что покупка данного актива, по мнению эксперта, не принесет прибыли, а под покупкой актива может пониматься как непосредственная покупка реального актива, так и действия по получению прибыли из снижения его стоимости.

Рассмотрим некоторое правило H для принятия решения о покупке активов, сформулированное на естественном языке и подход к его формализации средствами нечеткой логики.

Пусть H = «**Если** стоимость актива при покупке не высокая, **а** при продаже не низкая, **и** волатильность не очень высокая **и** много недавних сигналов на разные временные интервалы от доверенных экспертов о том, что актив надо покупать, **а также** крайне мало сигналов от доверенных экспертов о том, что актив покупать не надо, **то** актив стоит купить».

Отметим, что в данной работе не рассматривается целесообразность того или иного правила для инвестирования. В разное время и на разных площадках эффективные правила могут существенно отличаться. Правило *A* взято для примера построения нечеткого логического выражения на основе правил инвестирования, сформулированных не естественном языке.

Для формализации правила *H* достаточно ввести следующие лингвистические переменные и нечеткие множества.

1) Стоимость актива при покупке $P = \langle p, T_p, C_p, G_p, M_p \rangle$. По аналогии с заданием лингвистической переменной «волатильность» посредством табл. 1, зададим лингвистическую переменную *P* с помощью табл. 3.

2) Стоимость актива при продаже $L = \langle l, T_l, C_l, G_l, M_l \rangle$. Аналогично, данная лингвистическая переменная зададим посредством табл. 3.

3) Волатильность $V = \langle v, T_v, C_v, G_v, M_v \rangle$. Несмотря на то что лингвистическая переменная *V* была задана еще в табл. 1, в целях соблюдения базовой добросовестности при построении модели целесообразно переопределить данную переменную. Так как конкретные значения, приведенные в табл. 1, взяты для примера и не отражают наши представления относительно какого-либо конкретного актива и, тем более, не годятся для обобщенного, независимого от типа актива задания лингвистической переменной $V = \langle v, T_v, C_v, G_v, M_v \rangle$. Поэтому здесь и далее будем считать, что *V* задается табл. 3.

Таблица 3

Лингвистические переменные

Наименование элемента	Значение элемента
1	2
	P
T_p	{«низкая», «средняя», «высокая»}
C_p	N_0 – множество натуральных чисел и 0
$f_p(x)$	$P_f(x)$ – многочлен, удовлетворяющий требованиям $f_p(x)$ на ее области определения
$g_p(x)$	$P_g(x)$ – многочлен, удовлетворяющий требованиям $g_p(x)$ на ее области определения
G_p	M_p
«очень»	x^{α_p}
«крайне»	x^{β_p}
	L
T_l	{«низкая», «средняя», «высокая»}
C_l	N_0 – множество натуральных чисел и 0
$f_l(x)$	$L_f(x)$ – многочлен, удовлетворяющий требованиям $f_l(x)$ на ее области определения
$g_l(x)$	$L_g(x)$ – многочлен, удовлетворяющий требованиям $g_l(x)$ на ее области определения
G_l	M_l
«очень»	x^{α_l}
«крайне»	x^{β_l}

Продолжение табл. 3

1	2
Повторное определение лингвистической переменной *V*	
T_V	{«низкая», «средняя», «высокая»}
C_V	R – множество действительных чисел
$f_V(x)$	$V_f(x)$ – многочлен, удовлетворяющий требованиям $f_V(x)$ на ее области определения
$g_V(x)$	$V_g(x)$ –многочлен, удовлетворяющий требованиям $g_V(x)$ на ее области определения
G_V	M_V
«очень»	x^{α_v}
«крайне»	x^{β_v}
Q	
T_q	{«мало», «средне», «много»}
C_q	R – множество действительных чисел
$f_q(x)$	$Q_f(x)$ – многочлен, удовлетворяющий требованиям $f_q(x)$ на ее области определения
$g_q(x)$	$Q_g(x)$ – многочлен, удовлетворяющий требованиям $g_q(x)$ на ее области определения
G_q	M_q
«очень»	x^{α_q}
«крайне»	x^{β_q}
T	
T_τ	{«недавно», «средней давности», «давно»}
C_τ	N_0 – множество натуральных чисел и 0
$f_\tau(x)$	$T_f(x)$ – многочлен, удовлетворяющий требованиям $f_\tau(x)$ на ее области определения
$g_\tau(x)$	$T_g(x)$ – многочлен, удовлетворяющий требованиям $g_\tau(x)$ на ее области определения
G_τ	M_τ
«очень»	x^{α_τ}
«совсем»	x^{β_τ}
O	
T_o	{«маленькое», «среднее», «большое»}
C_o	R – множество действительных чисел
$f_o(x)$	$O_f(x)$ – многочлен, удовлетворяющий требованиям $f_o(x)$ на ее области определения
$g_o(x)$	$O_g(x)$ – многочлен, удовлетворяющий требованиям $g_o(x)$ на ее области определения
G_o	M_o
«очень»	x^{α_o}
«крайне»	x^{β_o}

4) Количество сигналов $Q = \langle q, T_q, C_q, G_q, M_q \rangle$. Зададим Q с помощью табл. 3.

5) Время появления сигнала $T = \langle \tau, T_\tau, C_\tau, G_\tau, M_\tau \rangle$. Рассмотрим табл. 3, в которой задана переменная *T*.

6) Количество различных временных интервалов Δt, на которые есть сигналы $O = \langle o, T_o, C_o, G_o, M_o \rangle$. Лингвистическая переменная *O* задана в табл. 3.

Пусть *S* – множество сигналов на момент принятия решения, представленных в виде (11). Введем следующие обозначения:

$|S| = m$, где – мощность (количество элементов) множества;

$S = \{s_1, s_2, ..., s_m\}$, причем $s_i = \langle k_i, b_i, t_i, \Delta t_i, \mu_i \rangle$, $\forall i = \overline{1, m}$;

рассмотрим также семейство множеств $S_1, S_2, ..., S_h$, таких что $S = \bigcup_{j=1}^{h} S_j$, $S_i \cap S_j = \varnothing$ для $\forall i, j = \overline{1, h}$, $S_i \neq \varnothing$ для $\forall s_{k_1}, s_{k_2} \in S_j$, $\Delta t_{k_1} = \Delta t_{k_2}$, $\forall j = \overline{1, h}$, а для $\forall s_{k_1}, s_{k_2} \in S$, $s_{k_1} \in S_j$, $s_{k_2} \notin S_j$, $\Delta t_{k_1} \neq \Delta t_{k_2}$, $\forall j = \overline{1, h}$.

Заметим, что семейство $S_1, S_2, ..., S_h$ подмножеств *S* является разбиением последнего на множества сигналов с одинаковыми значениями Δt, *h* – количество различных временных интервалов Δt, на которые есть сигналы в *S*.

Степени принадлежности нечетких множеств, формируемых значениями введенных лингвистических переменных, будем обозначать как μ_x^y, где *x* – значение переменной, *y* – ее имя, а соответствующие нечеткие множества обозначим M_x^y. Так, например, $\mu^P_{\text{высокая}}$ – функция принадлежности, формализующая значение лингвистической переменной *P* (стоимость актива при покупке), равное «высокая» или заданное этим значением такое нечеткое подмножество N_0, как «высокая стоимость актива при покупке» $\left(M^P_{\text{высокая}}\right)$.

Пусть $\widetilde{S}_{\text{new}}$ – нечеткое подмножество *S* $\left(\widetilde{S}_{\text{new}} \subset S\right)$, задающее недавние сигналы, тогда на основе теории нечетких множеств $\widetilde{S}_{\text{new}} = \left\{ \mu^T_{\text{недавно}}(t_i) \big/ s_i \mid \forall i = \overline{1, m} \right\}$. Аналогично нечеткое подмножество $\widetilde{S}_{\text{exp}} \subset S$, задающее сигналы от доверенных экспертов определяется как $\widetilde{S}_{\text{exp}} = \left\{ \mu_i \big/ s_i \mid \forall i = \overline{1, m} \right\}$. Тогда нечеткое подмножество $\widetilde{S}_{\text{rez}} \subset S$ недавних сигналов от доверенных экспертов определяется как пересечение вышерассмотренных нечетких множеств, а именно $\widetilde{S}_{\text{rez}} = \widetilde{S}_{\text{new}} \cap \widetilde{S}_{\text{exp}} = \left\{ T\left(\mu^T_{\text{недавно}}(t_i), \mu_i \right) \big/ s_i \mid \forall i = \overline{1, m} \right\}$, а нечеткое подмножество $\widetilde{S}^+_{\text{rez}} \subset S$ недавних сигналов от доверенных экспертов с рекомендацией покупки актива определяется как $\widetilde{S}^+_{\text{rez}} = \widetilde{S}_{\text{rez}} \cap \left\{ b_i / s_i \mid \forall i = \overline{1, m} \right\} = \left\{ b_i T\left(\mu^T_{\text{недавно}}(t_i), \mu_i \right) \big/ s_i \mid \forall i = \overline{1, m} \right\}$.

Если бы множество $\widetilde{S}^+_{\text{rez}}$ было классическим, то количество его элементов определялось как его мощность. В рамках теории нечетких множеств обобщением понятия мощность является кардинальное число w_{rez}, которое рассчитывается [8, 9] как

$$w_{\text{rez}} = \sum_{i=1}^{m} b_i T\left(\mu^T_{\text{недавно}}(t_i), \mu_i \right). \quad (12)$$

Аналогично множество сигналов от доверенных экспертов о том, что актив не надо покупать $\widetilde{S}_{\text{neg}}$ определяется как $\widetilde{S}_{\text{neg}} = \widetilde{S}_{\text{exp}} \cap \left\{ (1-b_i)/s_i \mid \forall i = \overline{1,m} \right\} =$ $= \left\{ \mu_i (1-b_i)/s_i \mid \forall i = \overline{1,m} \right\}$ Тогда количество элементов этого множества или его кардинальное число w_{neg} рассчитывается как

$$w_{\text{neg}} = \sum_{i=1}^{m} \mu_i (1-b_i). \tag{13}$$

Поясним использование множеств $\left\{ b_i/s_i \mid \forall i = \overline{1,m} \right\}$ и $\left\{ (1-b_i)/s_i \mid \forall i = \overline{1,m} \right\}$. Они представляют собой нечеткое представление таких классических подмножеств S, как множество сигналов с рекомендацией покупки актива S_{rez} и множество сигналов с рекомендацией воздержаться от покупки актива S_{neg} соответственно. Так как нечеткие множества являются обобщением классических множеств, последние могут быть заданы в нечетким виде. В этом случае степень принадлежности каждого элемента нечеткого множества становится тождественной характеристической функции [8, 9] обобщаемого им классического множества, а b_i и $1-b_i$ удобно совпадают со значением характеристических функций S_{rez} и S_{neg} соответственно. Кроме того, так как b_i и $1-b_i$ могут принимать в качестве значений только 0 или 1 для $\forall i = \overline{1,m}$, $T(b_i, x) = b_i x$ и $T((1-b_i), x) = (1-b_i)x$ для $\forall x \in [0,1]$. Отсюда имеем такие результаты пересечений при построении $\widetilde{S}^{+}_{\text{rez}}$ и $\widetilde{S}_{\text{neg}}$.

Переформулируем правило H в семантике значений рассмотренных лингвистических переменных и связок между ними. Назовем такую формулировку H'. Возьмем и зафиксируем некоторый актив k, положим, что все построения на основе множества сигналов были относительно k, тогда:

$H' =$ «**Если** $P_k =$ «не высокая», **и** $L_k =$ «не низкая», **и** $V_k =$ «не очень высокая», **и** $Q_{\widetilde{S}^{+}_{\text{rez}}}$ = «много», **и** $O_{S_1 \ldots S_h}$ = «большое», **и** $Q_{\widetilde{S}_{\text{neg}}}$ = «крайне мало», **то актив стоит купить**».

В качестве нижних индексов лингвистические переменные были выставлены номер актива или соответствующие множества. Обозначим $\mu_{\text{bye}}(H')$ степень принадлежности отражающую истинность правила H', тогда согласно принятым обозначения и введенным лингвистическим переменным и нечетким множествам:

$$\mu_{\text{bye}}(H') = T\Big(\mu^{p}_{\text{не высокая}}(a_k),\ \mu^{l}_{\text{не низкая}}(b_k),\ \mu^{V}_{\text{не очень высокая}}(c_k),$$

$$\mu^{q}_{\text{много}}(w_{rez}),\ \mu^{o}_{\text{большое}}(h),\ \mu^{q}_{\text{крайне мало}}(w_{\text{neg}})\Big) \tag{14}$$

Заметим, что в (14) использована норма относительно шести переменных, хотя классически в теории нечетких множеств норма определяется как функция двух переменных. Вместе с тем, норма, как и конорма, обладают свойствами коммутативности и ассоциативности [7], то есть $T(x,y) = T(y,x)$ и $T(T(x,y),z) = T(x,T(y,z))$, а также $S(x,y) = S(y,x)$ и $S(S(x,y),z) = S(x,S(y,z))$. Эти свойства позволяют определить норму и конорму относительно произвольного числа аргументов как последовательное взятие нормы и конормы соответст-

венно относительно нового аргумента и результата предыдущей итерации, не беря в учет порядок взятия этих операций. Для понимания удобно сравнить рассматриваемые операции с операцией суммы и произведения вещественных чисел. Данные операции также определены для двух аргументов, обладают свойствами ассоциативности и коммутативности и поэтому легко обобщаются на произвольное число элементов. Формально норму и конорму относительно произвольного (больше двух) числа элементов удобно задать, как:

$$\begin{cases} T(x_1, x_2, ..., x_m) = \begin{cases} T(x_1, x_2), m = 2, \\ T(x_m, S(x_1, x_2, ..., x_{m-1})), m > 2, \end{cases} \forall m \geq 2, x_i \in [0,1], i = \overline{1, m}; \\ S(x_1, x_2, ..., x_m) = \begin{cases} S(x_1, x_2), m = 2, \\ S(x_m, S(x_1, x_2, ..., x_{m-1})), m > 2, \end{cases} \forall m \geq 2, x_i \in [0,1], i = \overline{1, m}. \end{cases} \quad (15)$$

Выражения (12) – (15) с учетом конкретизированных значений в табл. 3 позволяют рассчитать $\mu_{\text{bye}}(H')$ – степень истинности правила H.

Вместе с тем таких правил может быть несколько и, более того, могут существовать правила, выполнение которых относительно конкретного актива свидетельствует о необходимости воздержаться от покупки последнего. Пусть $H_1, H_2, ..., H_e$ – совокупность правил с рекомендациями о покупке актива, а $F_1, F_2, ..., F_z$ – совокупность с рекомендацией воздержаться от такой покупки. По аналогии с построением H' на основе H, введя соответствующие лингвистические и нечеткие множества, построим семейства $H_1', H_2', ..., H_e'$ и $F_1', F_2', ..., F_z'$. Тогда синтаксически о целесообразности покупки актива свидетельствует высказывание вида H_1' или H_2' или ... или H_e', а об отсутствии целесообразности F_1' или F_2' или ... или F_z'. Связка «или» в рамках предложенной модели формализуется конормой. Тогда, если обозначить μ_{bye} – степень истинности того, что актив надо купить, а $\mu_{\text{not_bye}}$ – того, что от покупки стоит воздержаться, то

$$\begin{cases} \mu_{\text{bye}} = S\left(\mu_{\text{bye}}(H_1), \mu_{\text{bye}}(H_2), ..., \mu_{\text{bye}}(H_m)\right); \\ \mu_{\text{not_bye}} = S\left(\mu_{\text{not_bye}}(F_1), \mu_{\text{not_bye}}(F_2), ..., \mu_{\text{not_bye}}(F_m)\right). \end{cases} \quad (16)$$

Значения μ_{bye} и $\mu_{\text{not_bye}}$ являются степенями истинности высказываний в рамках нечеткой логики. Для степени истинности важными значениями являются 1, 0,5 и 0. Единица означает, что высказывание истинно, 0 – ложно, а 0,5 – в равной степени ложно и истинно, то есть на основе данного значения ничего нельзя сказать об истинности или ложности высказывания. В то время как значение степени истинности меньше 0,5 свидетельствует о том, что высказывание скорее ложно, чем истинно, а больше 0,5 – скорее истинно, чем ложно. Поэтому покупка актива целесообразно только в том случае, когда $\mu_{\text{bye}} > \mu_{\text{not_bye}}$ и $\mu_{\text{bye}} > 0{,}5$ и $\mu_{\text{not_bye}} < 0{,}5$ или в силу (16):

$$\begin{cases} S\left(\mu_{\text{bye}}(H_1), \mu_{\text{bye}}(H_2), ..., \mu_{\text{bye}}(H_m)\right) > 0{,}5; \\ S\left(\mu_{\text{not_bye}}(F_1), \mu_{\text{not_bye}}(F_2), ..., \mu_{\text{not_bye}}(F_m)\right) < 0{,}5. \end{cases} \quad (17)$$

Выражение (17) задает условие инвестирования. Тем не менее, заметим, что в построенной модели осталась большая доля неопределенности, связанной с видом нормы, конормы, операции отрицания, многочленов $P_f(x), P_g(x), L_f(x), L_g(x), V_f(x), V_g(x), Q_f(x), Q_g(x), T_f(x), T_g(x), O_f(x), O_g(x)$ и значениями чисел

$\alpha_p, \beta_p, \alpha_l, \beta_l, \alpha_v, \beta_v, \alpha_q, \beta_q, \alpha_\tau, \beta_\tau, \alpha_o, \beta_o$. Добавление новых правил способствует увеличению количества лингвистических переменных и, как следствие, неопределенности модели.

Вместе с тем полученная неопределенность позволяет подстраивать модель под конкретную торговую площадку или даже конкретный тип активов и конкретный набор экспертов. По любой торговой площадке существует статистика, включающая в себя как поведение активов, так и прогнозы экспертов и торговых роботов. На основе данной выборки можно обучить модель, выбрав такой вид многочленов, чисел, норм, конорм и операции отрицания, который позволил бы максимизировать прибыль, если бы на основе (17) осуществлялось принятие решения о покупке актива. По сути, это постановка довольно широкой оптимизационной задачи с потенциально неограниченным (из-за наличия многочленов с неопределенным числом элементов) числом параметров оптимизации. Такую задачу возможно решить посредством эволюционных алгоритмов [10 – 12], например, алгоритма дифференциальной эволюции [13] или каким-либо иным алгоритмом.

Подготовка финансовых управленческих решений на основе теории нечетких множеств будет способствовать построению систем искусственного интеллекта в экономике и позволит повысить эффективность хозяйственной деятельности.

Список литературы

1. Зайцева, О. Л. Стратегический и операционный анализ в финансовом менеджменте : монография / О. Л. Зайцева. – Новосибирск : СибУПК, 2018. – 157 с.

2. Хлусова, О. С. Разработка финансовой стратегии поведения компании на рынке ценных бумаг / О. С. Хлусова, И. Г. Рзун, А. Л. Зинченко // Вестник академии знаний. – 2018. – № 4 (27). – С. 248 – 254.

3. Романенко, А. В. Об информационных основах принятия решений при управлении хозяйствующим субъектом / А. В. Романенко, А. И. Попов, В. Л. Пархоменко // Наука и бизнес: пути развития. – 2013. – № 8 (26). – С. 134 – 136.

4. Романенко, А. В. О системных основах управления в реальном секторе экономики / А. В. Романенко, А. И. Попов, В. Л. Пархоменко // Вестник Волжского университета им. В. Н. Татищева. – 2014. – № 2 (31). – С. 28 – 35.

5. Dubois, D. A Review of Fuzzy Set Aggregation Connectives / D. Dubois, H. Prade // Information Sciences. – 1985. – Vol. 36, Issues 1-2. – P. 85 – 121.

6. Заде, Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. А. Заде ; пер. с англ. Н. И. Ринго ; под ред. Н. Н. Моисеева, С. А. Орловского. – М. : МИР, 1976. – 167 с.

7. Батыршин, И. З. Основные операции нечеткой логики и их обобщения / И. З. Батыршин. – Казань : Отечество, 2001. – 100 с.

8. Introduction to Algorithms, Second Edition / T. H. Cormen, Ch. E. Leiserson, R. L. Rivest, C. Stein. – The MIT Press and McGraw-Hill, 2001. – 984 p.

9. Поляков, Д. В. Обобщение векторно-пространственной модели для оценки семантической значимости характеристик текстовых документов / Д. В. Поляков, Н. М. Митрофанов, Е. Н. Лепешкин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2016. – № 2. – С. 45 – 55.

10. Растригин, Л. А. Адаптация сложных систем / Л. А. Растригин. – Рига : Зинатне, 1981. – 375 с.

11. Скобцов, Ю. А. Основы эволюционных вычислений : учеб. пособие / Ю. А. Скобцов. – Донецк : ДонНТУ, 2008. – 326 с.

12. Fogel, D. B. System Identification Through Simulated Evolution: A Machine Learning Approach to Modeling / D. B. Fogel. – Ginn Press,1991. – 207 p.

13. Price, K. V. Differential Evolution – A Practical Approach to Global Optimization / K. V. Price, R. M. Storn, J. A. Lampinen. – Springer, 2005. – 543 p.

Optimization of Financial Management Based on the Theory of Fuzzy Sets

D. V. Polyakov[1], A. I. Popov[2]

Departments of Information Systems and Information Protection (1), Equipment and Production Technology of Nanoproducts (2), dimadress@yandex.ru; TSTU, Tambov, Russia

Keywords: artificial intelligence; theory of fuzzy sets; activity management; digitalization of the economy.

Abstract: The necessity of formalizing the mechanism of making managerial decisions for their use in software and the feasibility of using the theory of fuzzy sets to build artificial intelligence systems is substantiated. The application of the theory of fuzzy sets to develop a mechanism for assessing the attractiveness of an investment project is shown. The description of the decision-making model for the acquisition of financial assets is given.

References

1. Zaytseva O.L. *Strategicheskiy i operatsionnyy analiz v finansovom menedzhmente: monografiya* [Strategic and operational analysis in financial management: a monograph], Novosibirsk: SibUPK, 2018, 157 p. (In Russ.)

2. Khlusova O.S., Rzun I.G., Zinchenko A.L. [Development of a financial strategy for a company's behavior in the securities market], *Vestnik akademii znaniy* [Bulletin of the Academy of Knowledge], 2018, no. 4 (27), pp. 248-254. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Romanenko A.V., Popov A.I., Parkhomenko V.L. [On the informational basis of decision-making in managing an economic entity], *Nauka i biznes: puti razvitiya* [Science and Business: Ways of Development], 2013, no. 8 (26), pp. 134-136. (In Russ., abstract in Eng.)

4. Romanenko A.V., Popov A.I., Parkhomenko V.L. [On the systemic foundations of management in the real sector of the economy], *Vestnik Volzhskogo universiteta im. V. N. Tatishcheva* [Bulletin of the Volga University. V. N. Tatishchev], 2014, no. 2 (31), pp. 28-35. (In Russ., abstract in Eng.)

5. Dubois D., Prade H. A Review of Fuzzy Set Aggregation Connectives, *Information Sciences*, 1985, vol. 36, issues 1-2, pp. 85-121.

6. Zade L.A., Moiseyev N.N., Orlovskiy S.A. [Eds.] *Ponyatiye lingvisticheskoy peremennoy i yego primeneniye k prinyatiyu priblizhennykh resheniy* [The concept of a linguistic variable and its application to the adoption of approximate solutions], Moscow: MIR, 1976, 167 p. (In Russ.)

7. Batyrshin I.Z. *Osnovnyye operatsii nechetkoy logiki i ikh obobshcheniya* [Basic operations of fuzzy logic and their generalization], Kazan: Otechestvo, 2001, 100 p. (In Russ.)

8. Cormen T.H., Leiserson Ch.E., Rivest R.L., Stein C. Introduction to Algorithms, Second Edition, *The MIT Press and McGraw-Hill*, 2001, 984 p.

9. Polyakov D.V., Mitrofanov N.M., Lepeshkin Ye.N. [Generalization of the vector-spatial model for assessing the semantic significance of the characteristics of text documents], *Pribory i sistemy. Upravleniye, kontrol', diagnostika* [Devices and Systems. Management, control, diagnostics], 2016, no. 2, pp. 45-55. (In Russ., abstract in Eng.)

10. Rastrigin L.A. *Adaptatsiya slozhnykh sistem* [Adaptation of complex systems], Riga: Zinatne, 1981, 375 p. (In Russ.)

11. Skobtsov Yu.A. *Osnovy evolyutsionnykh vychisleniy: uchebnoye posobiye* [Fundamentals of evolutionary computing: a training manual], Donetsk: DonNTU, 2008, 326 p. (In Russ.)

12. Fogel D.B. System Identification Through Simulated Evolution: A Machine Learning Approach to Modeling, *Ginn Press*, 1991, 207 p.

13. Price K.V., Storn R.M., Lampinen J.A. Differential Evolution – A Practical Approach to Global Optimization, *Springer*, 2005, 543 p.

Optimierung des Finanzmanagements auf der Grundlage der Fuzzy-Mengen-Theorie

Zusammenfassung: Es ist die Notwendigkeit der Formalisierung des Mechanismus für Managemententscheidungen zur Verwendung in Software-Tools und die Effizienz der Verwendung der Fuzzy-Mengen-Theorie zum Aufbau künstlicher Intelligenzsysteme begründet. Die Anwendung der Fuzzy-Mengen-Theorie zur Entwicklung des Mechanismus der Bewertung der Attraktivität des Investitionsprojekts ist gezeigt. Es ist die Beschreibung des Entscheidungsmodells für den Erwerb von finanziellen Vermögenswerten gegeben.

Optimisation de la gestion financière basée sur la théorie des ensembles flous

Résumé: Est argumentée la nécessitée de la formalisation du mécanisme d'adoption des décisions de gestion pour une utilisation dans les outils logiciels ainsi que l'argumentation de l'utilisation de la théorie des ensembles flous pour la construction des systèmes d'intelligence artificielle. Est montrée l'application de la théorie des ensembles flous pour l'élaboration d'un mécanisme d'évaluation de l'attractivité d'un projet d'investissement. Est décrit le modèle de la prise de la décision d'acquisition d'actifs financiers.

Авторы: ***Поляков Дмитрий Вадимович*** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные системы и защита информации»; ***Попов Андрей Иванович*** – кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: ***Литовка Юрий Владимирович*** **–** доктор технических наук, профессор кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

УДК 621.396.96
DOI: 10.17277/vestnik.2020.01.pp.079-084

ДИНАМИКА ПАРАМЕТРОВ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ

Е. И. Алгазин

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

Ключевые слова: коэффициент передачи линейной системы; система автоматики; собственное время электрической цепи; электрическая цепь.

Аннотация: Предложен способ описания линейных систем автоматики в области времени на основе классического аналитического выражения коэффициента передачи. Рассмотрено формирование выражения коэффициента передачи в рамках временно-энергетической модели колебательного процесса на входе и выходе рассматриваемых систем. Предложены аналитические способы описания коэффициентов передачи по энергии, по скорости изменения энергии, а также нормированного времени. Рассмотрена динамика данных коэффициентов передачи.

Введение

Существующие классические способы описания функционирования линейных систем применяются при представлении таких систем в области времени.

Поскольку исследуемые в данной работе системы представляют собой обычные четырехполюсники, то для их описания в области времени вполне подходят известные способы, основанные на использовании коэффициента передачи линейной системы. Все особенности используемых способов, такие как, например, наличие нулей и полюсов, также присутствуют при использовании выбранного способа.

Отметим, что данный способ анализа линейных систем представляет собой инженерный инструмент и позволяет качественно и количественно описать процессы, происходящие в области времени.

В работе предложен анализ поведения линейной системы, как в области времени, так и в области энергии.

Постановка задачи

Представим линейную систему в виде четырехполюсника, обладающего определенным коэффициентом передачи [1, 2]. Пусть на его входе действует колебательный затухающий процесс, описываемый в виде экспоненциально затухающей синусоиды в цепи R–L–C. Примем в этой цепи сопротивление R = 2 Ом, индуктивность L = 6 Гн, емкость C = 1 Ф, предварительно заряжена до U_0 = 100 В. Очевидно, что на выходе четырехполюсника будет действовать колебательный затухающий процесс, описываемый в виде экспоненциально затухающей синусоиды в цепи R–L–C с теми же значениями R, L и C , а U_0 = 120 В.

Необходимо получить аналитические выражения для коэффициентов передачи по энергии, скорости изменения энергии, а также для нормированного времени такого четырехполюсника при колебательном режиме на его входе и выходе.

Пути решения

На рисунке 1 предложена следующая геометрическая интерпретация временно-энергетической модели, по сути отображающая реакцию цепи R–L–C без источника питания с предварительно заряженным конденсатором [3].

Описание ее заключается в следующем: для каждого текущего значения энергии емкостного и индуктивного элемента вычисляются времена диссипации этих значений энергий. Окончательный массив времен диссипаций исследуемой электрической цепи формируется выбором максимального из вычисленных значений времен диссипаций энергии емкости или индуктивности. Это значение присваивается рассматриваемому элементу окончательного массива времен диссипаций, и так для всех элементов. Полученному таким образом окончательному массиву значений времен диссипаций соответствует массив значений энергий, каждый элемент которого поставлен в соответствие по номеру элемента окончательного массива времен диссипаций.

Отметим, что уменьшение энергии в рассматриваемой цепи соответствует уменьшению времени ее диссипации.

Рассмотрим колебательный разряд конденсатора в цепи R–L–C как наиболее сложный. В этом режиме функционирования исследуемой цепи напряжение на емкости представлено выражением [1, 2]

$$U_C(t) = \frac{U_0}{\omega_{св}\sqrt{LC}} e^{-\alpha t} \sin\left(\omega_{св} t + \operatorname{arctg}\left(\frac{\omega_{св}}{\alpha}\right)\right), \quad (1)$$

где U_0 – начальное значение напряжения на емкости; $\alpha = \frac{R}{2L}$ – декремент затухания; $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – собственная частота цепи R–L–C; $\omega_{св} = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$ – частота затухающих колебаний цепи R–L–C.

Энергия конденсатора равна

$$E_C(t) = \frac{CU_C^2(t)}{2}. \quad (2)$$

Ток в индуктивности описывается следующим образом

$$i_L(t) = \frac{U_0}{\omega_{св} L} e^{-\alpha t} \sin(\omega_{св} t + \pi). \quad (3)$$

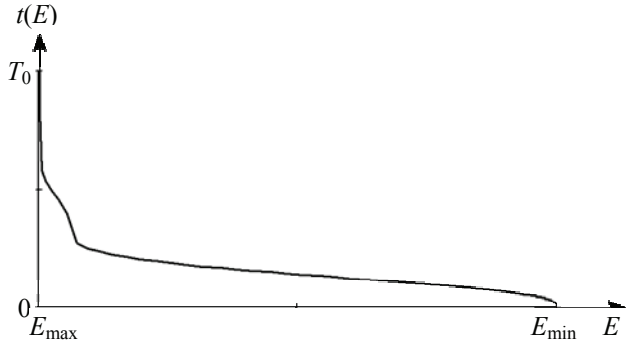


Рис. 1. Геометрическая интерпретация временно-энергетической модели R–L–C цепи без источника питания:

T_0 – собственное время цепи (максимальное время диссипации);

$E_{\max}$, $E_{\min}$ – максимальная и минимальная энергия в цепи соответственно

Энергия индуктивного элемента равна

$$E_L(t) = \frac{Li_L^2(t)}{2}. \tag{4}$$

Потери на диссипацию оцениваются по формуле

$$E = \int_0^T Ri^2(t)dt, \tag{5}$$

где $i(t)$ – ток в цепи; T – длительность интервала времени, на котором присутствует диссипация.

Предложен следующий способ оценки коэффициентов передачи исследуемого четырехполюсника по энергии, скорости изменения энергии, а также оценка нормированного времени.

Введем нормированное время, коэффициент которого представлен выражением его мгновенного отсчета

$$t_{t_k} = \frac{t_{\text{вых}_k}(E)}{t_{\text{вх}_k}(E) + 0{,}001}, \tag{6}$$

где $t_{\text{вых}_k}(E)$, $t_{\text{вх}_k}(E)$ – значения мгновенного отсчета по времени диссипации на выходе и входе четырехполюсника соответственно; 0,001 – константа, предотвращающая деление на ноль.

Коэффициент передачи по скорости изменения энергии представим как

$$t_{v_k} = \frac{v_{\text{вых}_k}}{v_{\text{вх}_k}}, \tag{7}$$

где $v_{\text{вых}_k}$, $v_{\text{вх}_k}$ – мгновенные отсчеты скорости изменения энергии на выходе и входе четырехполюсника соответственно.

Коэффициент передачи по энергии равен

$$t_{E_k} = \frac{E_{\text{вых}_k}}{E_{\text{вх}_k}}, \tag{8}$$

где $E_{\text{вых}_k}$, $E_{\text{вх}_k}$ – мгновенные значения энергии на выходе и входе четырехполюсника соответственно.

Кроме коэффициентов передачи по энергии и скорости изменения энергии, а также нормированного времени, для анализа динамики состояния линейной системы использовались значения скоростей изменения энергии на входе и выходе четырехполюсника, аналитические выражения которых имеют следующий вид:

$$v_{\text{вых}_k} = \frac{E_{\text{вых}_k} - E_{\text{вых}_{k-1}}}{t_{\text{вых}_k} - t_{\text{вых}_{k-1}} + 0{,}1};\ v_{\text{вх}_k} = \frac{E_{\text{вх}_k} - E_{\text{вх}_{k-1}}}{t_{\text{вх}_k} - t_{\text{вх}_{k-1}} + 0{,}1}, \tag{9}$$

где $t_{\text{вых}_k}$, $t_{\text{вх}_k}$ – мгновенные значения k-го отсчета времени на выходе и входе четырехполюсника соответственно; 0,1 – константа, предотвращающая деление на ноль.

Средние скорости изменения энергии имеют следующие аналитические выражения:

$$v_{\text{ср.вых}} = \frac{E_{\text{вых max}} - E_{\text{вых min}}}{t_{\text{вых}_0} - t_{\text{вых}_N}}, \tag{10}$$

где $t_{\text{вых}_0}$, $t_{\text{вых}_N}$ – мгновенные значения нулевого и N-го отсчетов времени на выходе четырехполюсника соответственно; $v_{\text{ср.вых}}$ – средняя скорость изменения энергии на выходе четырехполюсника;

$$v_{\text{ср.вх}} = \frac{E_{\text{вх max}} - E_{\text{вх min}}}{t_{\text{вх}_0} - t_{\text{вх}_N}}, \tag{11}$$

где $t_{\text{вх}_0}$, $t_{\text{вх}_N}$ – мгновенные значения нулевого и N-го отсчетов времени на входе четырехполюсника соответственно; $v_{\text{ср.вх}}$ – средняя скорость изменения энергии на входе четырехполюсника.

Средние скорости изменения энергии дополнительно вычисляются как среднее значение алгебраических сумм $v_{\text{вых}_k}$ и $v_{\text{вх}_k}$:

$$v_{\text{ср.вых}} = \frac{\sum_{k=1}^{N} v_{\text{вых}_k}}{N}; \quad v_{\text{ср.вх}} = \frac{\sum_{k=1}^{N} v_{\text{вх}_k}}{N}. \tag{12}$$

Результаты

Анализ поведения линейной системы автоматики приведен в области предложенных в данной работе параметров, описывающих данную систему. Результаты исследования приведены на рис. 2, а также в виде численных значений отдельных параметров.

Из рисунка 2 видно, что коэффициенты передачи четырехполюсника по энергии и скорости изменения энергии постоянны. Им соответствуют прямые линии. Это не противоречит основному подходу: значения мгновенных отсчетов энергии и скорость изменения энергии на выходе линейной системы представляют собой умноженные на коэффициенты передачи по энергии и скорости изменения энергии значения мгновенных отсчетов данных параметров на входе линейной системы.

Нормированное время остается постоянным до появления полюса, а затем уменьшается с ростом счетчика шагов до нуля. Это объясняется тем, что с ростом числа шагов уменьшается энергия вследствие диссипации, а затем и время диссипации. Это уменьшение в знаменателе выражения нормированного времени приводит к появлению полюса. После чего в числителе присутствует малая величина и общее значение нормированного времени близко к нулю.

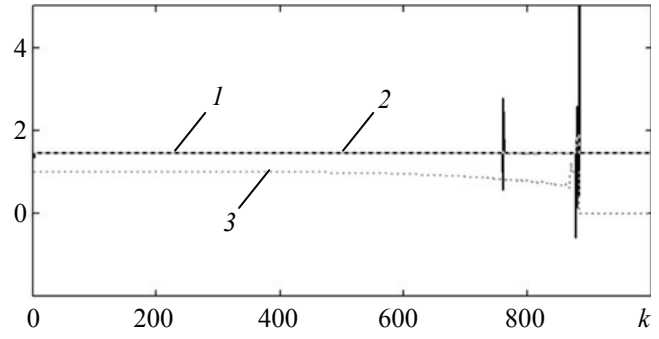


Рис. 2. Графики коэффициентов передачи по энергии (*1*), скорости изменения энергии (*2*) и нормированного времени (*3*); *k* – счетчик шагов

Энергия и скорость изменения энергии убывают в числителе и знаменателе неодинаково, что происходит вследствие диссипации энергии и приводит к появлению полюсов коэффициентов передачи по энергии и скорости изменения энергии. Появление полюса говорит о переходе системы в нестабильное состояние.

Значения средних скоростей изменения энергии, вычисленные первым способом:

$$v_{\text{ср.вых}} = 103{,}3; \;\; v_{\text{ср.вх}} = 75{,}758 .$$

Действительно, энергия на выходе четырехполюсника больше, чем на входе, что обуславливает превышение средней скорости изменения энергии на выходе.

Значения средних скоростей изменения энергии, вычисленные вторым способом:

$$v_{\text{ср.вых}} = 132{,}531; \;\; v_{\text{ср.вх}} = 92{,}035 .$$

Заключение

Предложен универсальный способ описания линейных систем автоматики в области времени и энергии, который пригоден для нахождения коэффициентов передачи по энергии и по скорости изменения энергии, а также нормированного времени. Представленная в работе временно-энергетическая модель позволяет использовать универсальные способы описания линейных систем автоматики.

Такой подход более информативно описывает рассматриваемые процессы, что обогащает методы анализа состояния линейных систем автоматики и позволяет проследить их динамику.

Список литературы

1. Зернов, Н. В. Теория радиотехнических цепей / Н. В. Зернов, В. Г. Карпов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Энергия, 1972. – 816 с.

2. Веселовский, О. Н. Основы электротехники и электротехнические устройства радиоэлектронной аппаратуры : учеб. пособие для вузов / О. Н. Веселовский, Л. М. Браславский. – М. : Высш. школа, 1977. – 312 с.

3. Алгазин, Е. И. Энергетический критерий устойчивости линейных систем автоматики / Е. И. Алгазин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2018. – Т. 24, № 2. – С. 210 – 215. doi: 10.17277/vestnik.2018.02.pp.210-215

Dynamics of Parameters for Assessing the State of Linear Automation Systems

E. I. Algazin

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

Keywords: transmission coefficient of a linear system; automation system; electric circuit time; electrical circuit.

Abstract: A method for describing linear automation systems is proposed in the time domain based on the classical analytical expression of the transmission coefficient. The formation of the expression of the transmission coefficient in the framework of the time-energy model of the oscillatory process at the input and

the output of the systems in question is considered. Analytical methods for describing the energy transfer coefficients, the rate of change of energy, and also normalized time are proposed. The dynamics of these transmission coefficients is considered.

References

1. Zernov N.V., Karpov V.G. *Teoriya radiotekhnicheskikh tsepey* [Theory of radio engineering circuits], Leningrad: Energiya, 1972, 816 p. (In Russ.)

2. Veselovskiy O.N., Braslavskiy L.M. *Osnovy elektrotekhniki i elektrotekhnicheskiye ustroystva radioelektronnoy apparatury: uchebnoye posobiye dlya vuzov* [Fundamentals of electrical engineering and electrical devices of electronic equipment: a textbook for high schools], Moscow: Vysshaya shkola, 1977, 312 p. (In Russ.)

3. Algazin Ye.I. [The energy criterion for the stability of linear automation systems], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2018, vol. 24, no. 2, pp. 210-215, doi:10.17277/vestnik.2018.02.pp.210-215 (In Russ., abstract in Eng.)

Die Dynamik der Parameter der Bewertung des Zustandes der linearen Automatisierungssysteme

Zusammenfassung: Es ist eine Methode zur Beschreibung linearer Automatisierungssysteme im Zeitbereich auf der Grundlage des klassischen analytischen Ausdrucks des Transmissionskoeffizienten vorgeschlagen. Es ist die Bildung des Ausdrucks des Transmissionskoeffizienten im Rahmen des Zeit-Energie-Modells des Schwingungsprozesses am Eingang und Ausgang der betrachteten Systeme untersucht. Vorgeschlagen sind analytische Methoden der Beschreibung der Energieübertragungskoeffizienten, der Koeffizienten der Geschwindigkeitsänderung der Energie, sowie auch der Koeffizienten der normalisierten Zeit. Es ist die Dynamik der Angaben der Übertragungskoeffizienten betrachtet.

Dynamique des paramètres d'évaluation de l'état des systèmes d'automatisation linéaires

Résumé: Est proposé un moyen de la description les systèmes d'automatisation linéaires dans le domaine du temps à la base de l'expression analytique classique du coefficient de la transmission. Est examinée la formation de l'expression du coefficient de la transmission dans le modèle temporo-énergétique du processus oscillatoire à l'entrée et la sortie des systèmes en question. Sont proposées des méthodes analytiques de la desription des coefficients du transfert de l'énergie selon la vitesse du changement de l'énergie et du temps normalisé. Est examinée l'évolution de ces coefficients de la transmission

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

Рецензент: ***Разинкин Владимир Павлович*** – доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретические основы радиотехники», ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск, Россия.

Процессы и аппараты химических и других производств. Химия

УДК 66.048.54
DOI: 10.17277/vestnik.2020.01.pp.085-090

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ВЫПАРИВАНИЯ КРИСТАЛЛИЗУЮЩИХСЯ РАСТВОРОВ

В. К. Леонтьев, О. Н. Кораблева

Кафедра «Химическая технология органических веществ», leontievvk@ystu.ru; ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», г. Ярославль, Россия

Ключевые слова: выпаривание; гидравлическое сопротивление; гидроциклон; интенсификация процесса; циркуляционный насос.

Аннотация: В целях интенсификации процесса выпаривания разработана схема выпарной установки с отделением кристаллов минеральных солей в гидроциклоне, установленном на циркуляционной линии выпарного аппарата. Определены основные конструкционные размеры выпарного аппарата и гидроциклона, а также проведен расчет гидравлического сопротивления циркуляционного контура выпарного аппарата. Подобран насос, обеспечивающий интенсивную циркуляцию раствора в контуре.

Введение

В настоящее время в условиях роста энергопотребления, ограниченности ресурсов традиционных видов топлива и обострения экологических проблем повышенное внимание уделяется природным минерализованным водам не только как источнику энергии, но и как источнику ценного минерального сырья. Извлекаемые из геотермальных вод соединения натрия, магния, брома, кальция, лития и другие минеральные соли находят широкое применение в химической промышленности. Технология комплексной переработки пластовых вод приобретает большое значение, в связи с возможностью улучшения состояния окружающей среды и обновления минерально-сырьевых ресурсов региона [1].

В ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет» совместно с ОАО НПЦ «Недра» разработана технологическая схема переработки геотермальных вод, добываемых из Медягинской скважины на территории Ярославской области. Начальный этап переработки геотермальных вод заключается в концентрировании солевых многокомпонентных растворов до перенасыщения основного компонента, например хлористого натрия, с последующим извлечением из концентрированного рассола других минеральных компонентов. Процесс выпаривания проводят в выпарных аппаратах специальной конструкции для кристаллизующихся растворов. Высокое содержание минеральных солей в геотермальных водах приводит к образованию кристаллического осадка (выпадению кристаллов хлорида натрия, кальция и других элементов) на внутренней поверхности трубок подогревателя, а затем к быстрому зарастанию и забивке тру-

бок теплообменника кристаллизующейся солью, в свою очередь снижающих эффективность выпаривания. В результате аппарат приходится промывать, а промывную воду упаривать, затрачивая на это дополнительную энергию [2].

Для интенсификации процесса выпаривания разработана схема выпарной установки для кристаллизующихся растворов с гидроциклоном, предотвращающим образование накипи и кристаллического осадка. Скорость разделения суспензии в поле действия центробежных сил в гидроциклоне выше, чем в поле действия силы тяжести. Поэтому, даже несмотря на небольшие размеры, гидроциклоны имеют высокую производительность, значительно превышающую производительность механических классификаторов.

При проектировании выпарного аппарата возник вопрос о возможности использования стандартного осевого насоса для обеспечения интенсивной циркуляции в контуре выпарного аппарата. Цель работы – определение гидравлического сопротивления в циркуляционном контуре «циркуляционная труба, циклон, кипятильные трубы теплообменника» и подбор насоса.

Проектирование выпарной установки для кристаллизующихся растворов

Зная производительность выпарного аппарата, начальную и конечную концентрации раствора, вакуумметрическое давление в сепараторе выпарного аппарата, рассчитан выпарной аппарат с принудительной циркуляцией и вынесенной греющей камерой. Аппарат состоит из следующих основных элементов: корпуса, подогревателя, сепаратора, гидроциклона, в котором под действием центробежной силы частицы твердой фазы отбрасываются к стенке аппарата и нисходящим спиральным потоком направляются к разгрузочному отверстию.

В качестве греющего агента выпарного аппарата для переработки геотермальных вод используется горячая вода температурой 115 °С с блока мини-ТЭЦ. Производительности по исходному раствору и выпариваемому растворителю составляют соответственно 1,58 и 0,78 кг/с, начальная и конечная концентрации раствора – 20 и 41 % соответственно, вакуумметрическое давление в сепараторе выпарного аппарата 0,45 ат. В результате расчетов выбран выпарной аппарат с принудительной циркуляцией и вынесенной греющей камерой, действительной площадью поверхности теплообмена 192 м^2, длиной труб 5 м, диаметром труб 38×2 мм [2, 3].

Для расчета конструктивных размеров гидроциклона использовали методику [4], согласно которой объемная производительность гидроциклона V, м^3/ч, рассчитывается по формуле

$$V \cong 0{,}94 d_{\text{вх}} d_{\text{ш}} \sqrt{\Delta p} ,$$

где $d_{\text{вх}}$, $d_{\text{ш}}$ – диаметры входного и шламового патрубков, см, соответственно; Δp – избыточное давление перед входным патрубком, ат.

Давление на входе в гидроциклон определяется из условия $\Delta p = 0{,}85\rho_{\text{р}}$ ($\rho_{\text{р}}$ – плотность раствора, г/см^3). Принято избыточное давление на входе в гидроциклон $\Delta p = 1$ ат. С учетом массового расхода циркулирующего раствора выбран стандартный гидроциклон диаметром $D = 2$ м с углом конусности 20° [5].

По заданной производительности и принятому перепаду давления Δp определены основные конструкционные размеры гидроциклона: наименьший диаметр входного патрубка $d_{\text{вх}}$, диаметры шламового патрубка $d_{\text{ш}}$ и песковой насадки $d_{\text{п}}$.

Расчет гидравлического сопротивления в циркуляционном контуре

Циркуляционный насос должен обеспечивать рабочую скорость движения газожидкостной смеси в кипятильных трубах, преодолевать гидравлическое сопротивление в циркуляционной трубе и гидроциклоне. Необходимо отметить, что циркуляционный поток, поднимающийся вверх по кипятильным трубам выпарного аппарата, представляет собой газожидкостную смесь с твердыми включениями кристаллов минеральных солей, а поток в циркуляционной трубе – жидкостной раствор с включением твердой фазы (кристаллов).

Для стабилизированного участка, по которому движется двухфазный поток, гидравлическое сопротивление определено по выражению [6]

$$\Delta p_{\text{т}} + \Delta p_{\text{ч}} = \lambda_{\text{с}} \frac{l_{\text{с}}}{d_{\text{тр}}} \frac{(G + G_{\text{т}})\nu}{2S},$$

где $\Delta p_{\text{т}}, \Delta p_{\text{ч}}$ − потери давления на трение раствора и твердых частиц соответственно, Па; $\lambda_{\text{с}}$ – коэффициент трения среды; $l_{\text{с}}$, $d_{\text{тр}}$ – длина и диаметр стабилизированного участка трубопровода, м; G, $G_{\text{т}}$ – массовый расход несущей среды и твердых частиц, кг/с; S – площадь поперечного сечения трубы, м^2; ν – скорость потока, м/с.

При этом коэффициент гидравлического трения рассчитывался

$$\Delta\lambda_{\text{с}} = \left[0{,}2 + \frac{0{,}88\beta_{\text{р}}}{(1+\beta_{\text{р}})^2}\right] \text{Re}_{\text{тр}}^{-0{,}2},$$

где $\beta_{\text{р}}$ – массовая концентрация твердой фазы, определяемая по выражению $\beta_{\text{р}} = \frac{G_{\text{т}}}{\rho_{\text{Т}} \nu S}$; $\text{Re}_{\text{тр}} = \frac{\nu d_{\text{тр}} \rho}{\mu}$ – критерий Рейнольдса.

Гидравлическое сопротивление газожидкостного потока в кипятильных трубах определялось по выражению [4]

$$\Delta p = \lambda \frac{nL}{d_{\text{э}}} \frac{\rho \nu^2}{2} + \sum \xi \frac{\rho \nu^2}{2},$$

где L – длина одного хода, м; n – число ходов; $d_{\text{э}}$ – эквивалентный диаметр, м; ρ – плотность газожидкостного потока в кипятильных трубах, кг/м^3; $\sum \xi$ – сумма коэффициентов местного сопротивления.

В результате расчетов получены гидравлические сопротивления в циркуляционной трубе и двухфазного потока в кипятильных трубах выпарного аппарата – 340 и 8150 Па соответственно.

Подбор циркуляционного насоса

С учетом высоты выпарного аппарата, а также гидравлического сопротивления гидроциклона рассчитан потребный напор $H_{\text{потр}}$, который составил около 16 м. На требуемую производительность стандартный осевой насос марки ОГ6-42 имеет напор 4,2 м. Данный насос не обеспечивает необходимый потребный напор. Для движения потоков в циркуляционном контуре выпарного аппарата и интенсивного отделения кристаллов в гидроциклоне необходимо изменить схему установки насоса и гидроциклона в циркуляционном контуре выпарного аппарата (рис. 1).

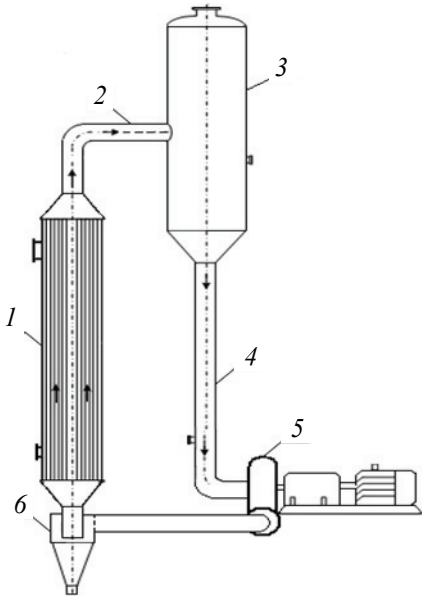


Рис. 1. Схема однокорпусной выпарной установки для кристаллизующихся растворов:
1 – кипятильные трубы подогревателя выпарного аппарата; *2* – труба вскипания; *3* – сепаратор; *4* – циркуляционная труба; *5* – насос, *6* – гидроциклон

Для предложенной схемы выпарной установки по величине потребного напора и необходимому расходу потока в циркуляционной линии выбран насосный агрегат серии 5-АНГК с подачей 1600 $м^3$/ч и напором 20 м.

Заключение

В целях интенсификации процесса выпаривания кристаллизующихся растворов минеральных солей разработана конструкция выпарного аппарата с гидроциклоном. Подобран насосный агрегат, который обеспечивает интенсивную циркуляцию раствора в контуре «гидроциклон, кипятильные трубы, циркуляционная труба».

Список литературы

1. Леонтьев, В. К. Применение процесса выпаривания для концентрирования геотермальных вод / В. К. Леонтьев, О. Н. Кораблева, Д. А. Барзыкина // Инновационно-технологическое развитие науки : сборник статей Международной научно-практической конференции : в 3-х частях ; 05 апреля 2017 г., Волгоград. – Уфа, 2017. – Ч. 3. – С. 29 – 32.

2. Леонтьев, В. К. Выпарной аппарат для кристаллизующихся растворов / В. К. Леонтьев, О. Н. Кораблева, Л. М. Соболева // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2018. – № 10. – С. 6 – 7.

3. Пат. на полезную модель 161443 Российская Федерация, МПК B01D 1/12 Выпарной аппарат для кристаллизующихся растворов / В. М. Бурцева, В. К. Леонтьев, О. Н. Кораблева ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет». – № 2014147464/05 ; заявл. 25.11.2014 ; опубл. 20.04.2016, Бюл. № 11. – 2 с.

4. Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии : учеб. пособие для вузов / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков. – 13-е изд. – М. : АльянС, 2005. – 576 с.

5. ТУ 1104–022–05773333–2008. Гидроциклоны. – Введ. 2008-06-15. – Первоуральск : ОАО «Первоуральский завод горного оборудования», 2008. – 13 с.

6. Гельперин, Н. И. Основные процессы и аппараты химической технологии / Н. И. Гельперин. – М. : Химия, 1981. – 812 с.

Intensification of the Process of Evaporation of Crystallizing Solutions

V. K. Leontyev, O. N. Korableva

Department of Chemical Technology of Organic Substances, leontievvk@ystu.ru; Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia

Keywords: evaporation; hydraulic resistance; hydrocyclone; process intensification; circulation pump.

Abstract: In order to intensify the evaporation process, a scheme of an evaporation unit with separation of crystals of mineral salts in a hydrocyclone installed on the circulation line of the evaporator was developed. The main structural dimensions of the evaporator and hydrocyclone are determined, and the hydraulic resistance of the circulation circuit of the evaporator is calculated. A pump that provides intensive circulation of the solution in the circuit is selected.

References

1. Leont'yev V.K., Korableva O.N., Barzykina D.A. *Innovatsionno-tekhnologicheskoye razvitiye nauki: sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: v 3-kh chastyakh* [Innovative and technological development of science: a collection of articles by the International Scientific practical conference: in 3 parts], 05 April, 2017, Volgograd, Ufa, 2017, Part 3, pp. 29-32. (In Russ.)

2. Leont'yev V.K., Korableva O.N., Soboleva L.M. [Evaporation apparatus for crystallizing solutions], *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye* [Chemical and oil and gas engineering], 2018, no. 10, pp. 6-7. (In Russ.)

3. Burtseva V.M., Leont'yev V.K., Korableva O.N. *Vyparnoy apparat dlya kristallizuyushchikhsya rastvorov* [The evaporator for crystallizing solutions], Russian Federation, 2016, Pat. Utility Model 161443. (In Russ.)

4. Pavlov K.F., Romankov P.G., Noskov A.A. *Primery i zadachi po kursu protsessov i apparatov khimicheskoy tekhnologii: uchebnoye posobiye dlya vuzov* [Examples and tasks on the course of processes and apparatuses of chemical technology: textbook for universities], Moscow: Al'yanS, 2005, 576 p. (In Russ.)

5. TU 1104–022–05773333–2008. *Gidrotsiklony* [Hydrocyclones], Pervoural'sk: OAO «Pervoural'skiy zavod gornogo oborudovaniya», 2008, 13 p. (In Russ.)

6. Gel'perin N.I. *Osnovnyye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii* [The main processes and apparatuses of chemical technology], Moscow: Khimiya, 1981, 812 p. (In Russ.)

Intensivierung des Verdampfungsprozesses der kristallisierenden Lösungen

Zusammenfassung: Um den Verdampfungsprozess zu intensivieren, ist das Schema der Verdampfungsanlage mit Trennung von Mineralsalzkristallen in einem Hydrozyklon entwickelt, der an der Zirkulationsleitung des Verdampfers installiert ist. Es sind die Hauptstrukturabmessungen des Verdampfers und des Hydrozyklons bestimmt, sowie auch die Berechnungen des hydraulischen Widerstands des Zirkulationskreislaufs des Verdampfers durchgeführt. Es ist eine Pumpe ausgewählt, die eine intensive Zirkulation der Lösung im Kreislauf gewährleistet.

Intensification du processus de l'évaporation des solutions cristallisées

Résumé: Dans le but de l'intensification du processus de l'évaporation est élaborré le schéma de l'installation de l'évaporation avec la séparation des cristaux des sels de minéraux dans un hydrocyclone installé sur la ligne de circulation de l'appareil de l'évaporation. Sont définies les principales dimensions structurelles de l'évaporateur et de l'hydro-cyclone; est calculée la résistance hydraulique du circuit de circulation de l'évaporateur. Est choisie une pompe pour assurer la circulation intentionnelle de la solution dans le circuit.

Авторы: ***Леонтьев Валерий Константинович*** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Химическая технология органических веществ»; ***Кораблева Ольга Николаевна*** – кандидат химических наук, доцент кафедры «Химическая технология органических веществ», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», г. Ярославль, Россия.

Рецензент: ***Лебедев Антон Евгеньевич*** **–** доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технологические машины и оборудование», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», г. Ярославль, Россия.

УДК 66.045.122
DOI: 10.17277/vestnik.2020.01.pp.091-099

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ДИАМЕТРА ТРУБОПРОВОДА С УЧЕТОМ ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ

А. Б. Голованчиков[1], Т. А. Дулькин[2], Н. А. Прохоренко[1], Н. А. Меренцов[1]

Кафедра «Процессы и аппараты химических и пищевых производств», ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» (1), natasha292009@yandex.ru; г. Волгоград, Россия; ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов» (2), г. Москва, Россия

Ключевые слова: гидравлическое сопротивление; диаметр трубы; капитальные затраты; ламинарное, переходное и турбулентное течения; оборотные средства; общая стоимость; оптимизация; энергозатраты.

Аннотация: Дано описание алгоритма расчета оптимального диаметра трубопровода и его технологических параметров с учетом энергозатрат, связанных с гидравлическим сопротивлением, амортизационных отчислений на капитальные затраты и оборотных средств на эксплуатацию и ремонт. Приведены примеры расчетов для газо- и нефтепровода и раствора полимера, с турбулентным, переходным и ламинарным течениями жидкостей и газа. В каждом случае в зависимости от числа Рейнольдса выбирается в расчетах коэффициент сопротивления для гидравлически гладких труб или рассчитывается по известным формулам Никурадзе и Блазиуса или автомодельного режима течения с учетом шероховатости. Показано, что необходимая мощность насоса или компрессора в зависимости от вышеназванных режимов течения зависит от диаметра трубопровода d_t^{-4} – для ламинарного потока, $d_t^{-4,75}$ – для переходного режима течения и d_t^{-5} – для турбулентного течения.

Введение

Затраты, связанные с эксплуатацией трубопроводов от магистральных до внутрицеховых, включают в себя стоимость электроэнергии, затрачиваемой на работу насосов или компрессов для преодоления линейных и местных гидравлических потерь, амортизационных отчислений на капитальные затраты и оборотных средств на эксплуатацию и ремонт. Обычно основную долю в суммарных затратах занимают вышеназванные энергозатраты. Поэтому основное внимание в научных и проектных работах уделяется снижению гидравлического сопротивления [1 – 3]. Основные методы здесь связаны с уменьшением эффективной вязкости и шероховатости стенок трубы. В работах [4 – 8] также предложено несколько способов и устройств для уменьшения гидравлического сопротивления, связанных прежде всего с созданием маловязкого пристенного кольцевого слоя газа или жидкости. Но здесь основной проблемой остается неустойчивость пристенного кольцевого маловязкого слоя. При ламинарном течении он «теряется» через несколько километров, при переходном и турбулентном – смешивается с основным потоком перекачиваемой жидкости через несколько сот метров.

Алгоритм расчета

Ниже описывается алгоритм расчета оптимального диаметра трубы и его технологических параметров, обеспечивающих минимум суммарных затрат энергии, капитальных затрат и оборотных средств при турбулентном течении газа [9], к которым добавлены алгоритмы расчета трубопровода для жидкостей при их переходном и турбулентном течении. В таблице 1 даны исходные и справочные данные и результаты расчетов для турбулентного течения природного газа, переходного течения нефти и ламинарного течения раствора [9].

Таблица 1

Исходные и справочные данные, расчетные параметры программы «trybaopt»

Наименование	Размерность	Обозначение		Значение		
		литература	программа	газ	раствор	нефть тяжелая
1	2	3	4	5	6	7
Исходные данные						
Производительность	$м^3/ч$	q_v	qv	6000	400	600
Длина трубопровода	м	l_t	lt	4000	4000	4000
Справочные данные						
Молекулярная масса	кг/кмоль	M	M	16	–	–
Температура	°С	t	t	15	15	15
Давление среднее	ата	p	p	1,15	2,9	1,43
Плотность	$кг/м^3$	ρ	ρ	0,754	900	1050
Вязкость при рабочей температуре	$м^2/с$	μ	μ	$1{,}15\cdot10^{-5}$	0,25	0,07
К.П.Д. привода насоса или компрессора	–	χ	kcu	0,5	0,5	0,5
Стоимость электроэнергии	р/(кВТ·ч)	C_l	Cl	3	3	3
Амортизационные отчисления за 1 м длины и 1 м диаметра в год	$р/(м^2\cdot год)$	$A_к$	Ak	18	18	18
Отчисления за ремонт и обслуживание	‖	$A_{ос}$	Aoc	13,5	13,5	13,5
Коэффициент трения для потока	–	λ	lam	0,03	0,039	0,035
Доля потерь давления от местных сопротивлений по сравнению с линейными потерями давления	–	Δp_l	dpl	0,1	0,1	0,1
Расчетные параметры						
Плотность при рабочей температуре и давления (для газа)	$кг/м^3$	ρ	rog	0,754	900	1050
Постоянный коэффициент при расчете гидравлического сопротивления	–	$K_{\Delta p}$	Kdp	201,4	4529,4	1096,6

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
Коэффициент стоимости электроэнергии	–	a_1	a1	$6{,}87\cdot10^6$	$1{,}08\cdot10^7$	$3{,}95\cdot10^6$
Коэффициент стоимости амортизационных отчислений	–	a_2	a2	$1{,}26\cdot10^5$	$1{,}26\cdot10^5$	$1{,}26\cdot10^5$
Расчетный диаметр трубы	м	d_t	dt	0,392	0,311	0,419
Гидравлические сопротивления трубопровода	Па	Δp	dp	21761	$4{,}86\cdot10^5$	$6{,}85\cdot10^4$
Скорость в трубе	м/с	υ_g	ug	13,1	1,46	1,21
Число Рейнольдса	–	Re_g	Reg	$3{,}36\cdot10^5$	1639,7	6518,8
Мощность привода	кВт	N	N	34,37	53,9	11,42
Потеря давления	ата	Δp_a	dpa	0,222	4,95	0,7
Стоимость электроэнергии	р/год	E	E	742 365	$1{,}17\cdot10^6$	246 643
Стоимость амортизационных отчислений за капитальные затраты	‖	$E_к$	Ek	28 222,6	22 374	30 150
Стоимость оборотных средств	‖	$E_е$	Ee	21 167	16 780,5	22 612
Общая стоимость затрат	‖	$E_о$	Eo	791 754,8	$1{,}2\cdot10^6$	$2{,}99\cdot10^5$
Общий объем перекачиваемой среды	$м^3$	$V_{об}$	Vob	$4{,}32\cdot10^7$	$2{,}88\cdot10^6$	$4{,}32\cdot10^6$
Затраты на транспортировку 1000 $м^3$	р/год	C_t	Ct	18,32	418,36	69,3
Доля электроэнергии в общей стоимости	–	$O_е$	Oe	0,938	0,968	0,824
Доля амортизационных отчислений за капитальные затраты	–	$O_{ке}$	Oke	0,036	0,019	0,101
Доля оборотных средств в общей стоимости	–	$O_{ее}$	Oee	0,027	0,014	0,076

Примечание. 1. « – » – прочерк в справочных данных означает, что для жидкостей плотность задается при рабочей температуре, а для газов рассчитывается в пункте1 представленного алгоритма.

2. « ‖ » – скобки в справочных данных означают, что коэффициент трения рассчитывается для ламинарного режима $\lambda = 64 / \mathrm{Re}$, для переходного – $\lambda = 0{,}316 / \mathrm{Re}^{0{,}25}$ [8].

1. Плотность перекачиваемого газа при рабочей температуре и давлении

$$\rho_g = \frac{M}{22{,}4}\left(\frac{273}{273+t}\right)\left(p \middle/ 1{,}003\right),$$

(плотности жидкостей задаются в табл. 1 при рабочем давлении и температуре).

2. Объемный расход газа при рабочем давлении и температуре

$$\rho_{vp} = (q_v/3600)\left(\frac{1{,}033}{p}\right)\left(\frac{273+t}{273}\right);$$

– для жидкостей

$$\rho_{vp} = q_v/3600.$$

3. Общие потери давления по длине и от местных сопротивлений:

а) для турбулентного режима, $\mathrm{Re} > 10^4$, гидравлическое сопротивление

$$\Delta p = K_{\Delta p}/d_t^5,$$

где $K_{\Delta p} = 1{,}1\lambda l_t \rho_g (q_{vp}/0{,}785)^2/2$; λ – функция шероховатости;

– коэффициент стоимости электроэнергии

$$a_1 = 7200 c_l q_{vp} K_{\Delta p};$$

– коэффициент стоимости амортизационных отчислений за капитальные затраты и оборотных средств

$$a_2 = (A_{\text{к}} + A_{\text{ос}})\, l_t;$$

– расчетный диаметр трубопровода

$$d_t = (a_2/5a_1)^{1/6};$$

– скорость

$$\upsilon_g = q_{vp}/(0{,}785 d_t^2);$$

– число Рейнольдса

$$\mathrm{Re}_g = \upsilon_g d_t \rho_g/\mu_g;$$

– мощность электроэнергетической установки

$$N = q_{vp} K_{\Delta p}/1000 d_t^5;$$

б) для переходного режима, $2320 < \mathrm{Re} < 10000$, гидравлическое сопротивление

$$\Delta p = K_{\Delta p}/d_t^{4{,}75},$$

где $K_{\Delta p} = 0{,}282 l_t (\mu_g \rho_g)^{0{,}75} q_{vp}^{1{,}75}$;

$$a_1 = 7200 c_l q_{vp} K_{\Delta p};$$

$$d_t = (a_2/4{,}75a_1)^{1/5{,}73};$$

$$N = q_{vp} K_{\Delta p}/1000 d_t^{4{,}75};$$

$$\lambda = \frac{0{,}316}{\mathrm{Re}_g};$$

в) для ламинарного режима, Re < 2320, гидравлическое сопротивление

$$\Delta p = K_{\Delta p} \big/ d_t^4,$$

где $K_{\Delta p} = 32\mu_g \rho_g \, q_{vp} / 0{,}785$;

$$a_1 = 7200 c_l q_{vp} K_{\Delta p};$$

$$d_t = \left(a_2 / 4a_1\right)^{1/5};$$

$$N = q_{vp} \, K_{\Delta p} \big/ 1000 d_t^4;$$

$$\lambda = \frac{64}{\mathrm{Re}_g}.$$

4. Гидравлическое сопротивление в атмосферах

$$\Delta p_a = \Delta p \big/ 9{,}81 \cdot 10^4.$$

5. Стоимость электроэнергии за год

$$E = 7200 c_l N.$$

6. Стоимость амортизационных отчислений за капитальные затраты

$$E_{\text{к}} = A_{\text{к}} l_t d_t.$$

7. Стоимость оборотных средств

$$E_{\text{е}} = A_{\text{ос}} l_t d_{\,t}.$$

8. Общие затраты

$$E_{\text{о}} = E + E_{\text{к}} + E_{\text{е}}.$$

9. Общий объем перекачиваемой жидкости или газа за год

$$V_{\text{об}} = 7200 q_v.$$

10. Затраты на транспортировку 1000 м^3 перекачиваемой жидкости или газа в год

$$C_t = 1000 \, E_{\text{о}} / V_{\text{об}}.$$

11. Доля затрат в общих затратах:

а) на электроэнергию

$$O_{\text{е}} = E / E_{\text{о}};$$

б) на амортизационные отчисления от капитальных затрат

$$O_{\text{ке}} = E_{\text{к}} / E_{\text{о}};$$

в) на оборотные средства

$$O_{\text{ее}} = E_{\text{е}} / E_{\text{о}}.$$

Результаты расчетов

Результаты расчетов представлены выше (см. табл. 1).

Необходимая мощность насоса или компрессора в зависимости от вышеназванных режимов течения зависит от диаметра трубопровода d_t^{-4} для ламинарного потока, $d_t^{-4,75}$ – для переходного режима течения и d_t^{-5} – для турбулентного течения. Обратные зависимости от диаметра мощности, а значит газовых затрат на электроэнергию и прямо пропорциональные зависимости амортизационных отчислений и оборотных средств в суммарной стоимости всех этих годовых затрат позволяют минимизировать суммарные годовые затраты после приравнивания к нулю производной от суммарных затрат. Анализ результатов расчетов показывает, что наибольшее влияние на долю в общих затратах оказывают энергозатраты, связанные в основном с вязкостью перекачиваемой среды и в меньшей степени с турбулизацией потока. Доля энергозатрат в эксплуатации трубопровода для раствора даже при ламинарном его течении составляет более 96 %, для газа, движущемся в турбулентном режиме – около 94 %, а для нефти в переходном режиме – менее 83 %. Вторыми по величине затрат являются амортизационные отчисления, которые изменяются в пределах 2 – 10 %, а эксплуатационные расходы не превышают 3 % от общей стоимости перекачивания жидкостей или газа по трубопроводу. При скорости газа, в 10 раз большей скорости нефти, и соответственно большем его расходе, оптимальные диаметры трубопроводов являются практически одинаковыми и составляют около 400 мм, а для скорости растворов в трубопроводе, расход раствора в котором в 15 раз меньше расхода газа и в 1,5 раза меньше расхода нефти, оптимальный диаметр должен составить около 500 мм, то есть на 20 % больше, чем для газо- и нефтепровода. Последнее также объясняется значительно большей вязкостью раствора, которая в 3,5 раза больше вязкости нефти и в 20 тысяч раз больше вязкости газа, так как при ламинарном движении раствора энергозатраты в наибольшей степени зависят от вязкости.

Заключение

Результаты расчетов показывают, что наибольшее влияние на потери давления, а значит и энергозатраты на перекачивание жидкости, оказывает ее вязкость. Так, вязкость раствора в 3,5 раза больше вязкости нефти, в 2×10^4 раз больше вязкости воздуха и, хотя раствор перекачивается в ламинарном режиме (Re = 1640), нефть в переходном Re = 6519, а газ в турбулентном и расход раствора в 1,5 раза меньше, чем для тяжелой нефти, и в 15 раз меньше, чем для газа, потери давления на одинаковой длине в 12,4 раза больше, чем для нефти, и в 22,3 раза больше, чем для газа. Соответственно, доля энергозатрат, составляющая 96,8 % от общей стоимости эксплуатации трубы трубопровода с учетом амортизационных отчислений и оборотных средств на капремонт и обслуживание, выше, чем для нефте- и газопроводов. То же касается и затрат на транспортировку 1000 м^3 каждого из вышеперечисленных веществ – для растворопровода в 6 раз больше, чем для нефтепровода и в 22,8 раза больше, чем для газопровода. Отметим, что во всех случаях выдерживается рекомендуемая скорость газов (10…30) м/с и жидкостей (1…2) м/с.

Заниженный по расчету оптимальный диаметр трубопровода для раствора, по сравнению с диаметрами нефте- и газопроводов (последние отличаются в среднем на 3,5 %), объясняется меньшей производительностью.

Таким образом, разработанный алгоритм расчетов оптимальных технологических параметров и диаметра трубопровода для жидкостей и газов с учетом различного режима течения в них веществ позволяет минимизировать суммарные энергетические затраты, амортизационные отчисления на капитальные затраты и оборотные средства на эксплуатацию и ремонт трубопровода.

Список литературы

1. Алиев, Р. А. Трубопроводный транспорт нефти и газа : учебник для вузов / Р. А. Алиев, В. Д. Белоусов, А. Г. Немудров. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Недра, 1988. – 368 с.

2. Коннова, Г. В. Оборудование транспорта и хранения нефти и газа : учеб. пособие для вузов / Г. В. Коннова. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2006. – 128 с.

3. Мастобаев, Б. Н. Химические средства и технологии в трубопроводном транспорте нефти / Б. Н. Мастобаев, А. М. Шаммазов, Э. М. Мовсумзаде. – М. : Химия, 2002. – 296 с.

4. Голованчиков, А. Б. Теоретические основы течения жидкостей в трубопроводе с маловязким пограничным слоем / А. Б. Голованчиков, А. В. Ильин, Л. А. Ильина. – Волгоград : ВолгГТУ, 2008. – 92 с.

5. Пат. 2262035 Российская Федерация, МПК F17D 1/14, F15D 1/02. Способ перемещения вязких нефтей и нефтепродуктов / А. Б. Голованчиков, Л. А. Ильина, А. В. Ильин, Н. А. Дулькина, А. Б. Дулькин, Е. Н. Конопальцева ; заявитель и патентообладатель Волгоградский государственный технический университет. – № 2004109505/06 ; заявл. 29.03.2004 ; опубл. 10.10.2005, Бюл. № 28. – 7 с.

6. Пат. 2285198 Российская Федерация, МПК F17D 1/20, F15D 1/06. Устройство для уменьшения гидравлических потерь в трубопроводе / А. Б. Голованчиков, Л. А. Ильина, А. В. Ильин, Н. А. Дулькина, А. Б. Дулькин, Д. С. Каращук ; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Волгоградский государственный технический университет. – № 2005107289/06 ; заявл. 15.03.2005 ; опубл. 10.10.2006, Бюл. № 28. – 5 с.

7. Пат. 2241868 Российская Федерация, МПК F15D 1/06, F17D 1/20. Устройство для уменьшения гидравлических потерь в трубопроводе / А. Б. Голованчиков, А. В. Ильин, Л. А. Ильина, В. Ф. Лобойко, М. В. Якушко ; заявитель и патентообладатель Волгоградский государственный технический университет. – № 2003110552/06 ; заявл. 14.04.2003 ; опубл. 10.12.2004, Бюл. № 34.

8. Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков. – 10-е изд., перераб. и доп. – Л. : Химия, 1987. – 576 с.

9. Свидетельство о гос. рег. программ для ЭВМ № 2019615073. Программа для расчета технологических и экономических параметров и оптимального диаметра трубопровода для перекачивания жидкостей и газов / А. Б. Голованчиков, Н. А. Прохоренко, Н. А. Меренцов, Т. А. Дулькин (РФ). Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ. – 18 апреля 2019.

Optimization of Technological Parameters and Diameter of the Pipeline, Taking into Account Energy and Resource Conservation

A. B. Golovanchikov[1], T. A. Dulkin[2], N. A. Prokhorenko[1], N. A. Merentsov[1]

Department of Processes and Apparatuses of Chemical and Food Production,
Volgograd State Technical University (1),
natasha292009@yandex.ru; Volgograd, Russia;
Peoples' Friendship University of Russia (2), Moscow, Russia

Keywords: hydraulic resistance; pipe diameter; capital expenditures; laminar, transitional and turbulent flows; current assets; total cost; optimization; energy costs.

Abstract: A description of an algorithm for calculating the optimum diameter of a pipeline and its technological parameters, is given taking into account energy costs associated with hydraulic resistance, depreciation deductions for capital costs and working capital for operation and repair. Examples of calculations for gas and oil pipelines and polymer solutions with turbulent, transitional and laminar flows of liquids and gas are given. In each case, depending on the Reynolds number, the drag coefficient for hydraulically smooth pipes is selected in the calculations or calculated according to the well-known formulas of Nikuradze and Blasius or the self-similar flow regime taking into account the roughness. It is shown that the required pump or compressor power, depending on the above flow regimes, depends on the diameter of the pipeline d_t^{-4} – for laminar flow, $d_t^{-4,75}$ – for transitional flow regime, and d_t^{-5} – for turbulent flow.

References

1. Aliyev R.A., Belousov V.D., Nemudrov A.G. *Truboprovodnyy transport nefti i gaza: uchebnik dlya vuzov* [Pipeline transport of oil and gas: a textbook for universities], Moscow: Nedra, 1988, 368 p. (In Russ.)

2. Konnova G.V. *Oborudovaniye transporta i khraneniya nefti i gaza: uchebnoye posobiye dlya vuzov* [Equipment for transport and storage of oil and gas: a study guide for universities], Rostov-on-Don: Feniks, 2006, 128 p. (In Russ.)

3. Mastobayev B.N., Shammazov A.M., Movsumzade E.M. *Khimicheskiye sredstva i tekhnologii v truboprovodnom transporte nefti* [Chemical means and technologies in pipeline transportation of oil], Moscow: Khimiya, 2002, 296 p. (In Russ.)

4. Golovanchikov A.B., Il'in A.V., Il'ina L.A. *Teoreticheskiye osnovy techeniya zhidkostey v truboprovode s malovyazkim pogranichnym sloyem* [Theoretical foundations of the flow of liquids in a pipeline with a low-viscosity boundary layer], Volgograd: VolgGTU, 2008, 92 p. (In Russ.)

5. Golovanchikov A.B., Il'ina L.A., Il'in A.V., Dul'kina N.A., Dul'kin A.B., Konopal'tseva Ye.N. *Sposob peremeshcheniya vyazkikh neftey i nefteproduktov* [Method of moving viscous oils and oil products], Russian Federation, 2005, Pat. 2262035. (In Russ.)

6. Golovanchikov A.B., Il'ina L.A., Il'in A.V., Dul'kina N.A., Dul'kin A.B., Karashchuk D.S. *Ustroystvo dlya umen'sheniya gidravlicheskikh poter' v truboprovode* [A device for reducing hydraulic losses in a pipeline], Russian Federation, 2006, Pat. 2285198. (In Russ.)

7. Golovanchikov A.B., Il'in A.V., Il'ina L.A., Loboyko V.F., Yakushko M.V. *Ustroystvo dlya umen'sheniya gidravlicheskikh poter' v truboprovode* [A device for reducing hydraulic losses in a pipeline], Russian Federation, 2004, Pat. 2241868. (In Russ.)

8. Pavlov K.F., Romankov P.G., Noskov A.A. *Primery i zadachi po kursu protsessov i apparatov khimicheskoy tekhnologii* [Examples and tasks for the course of processes and devices of chemical technology], Leningrad: Khimiya, 1987, 576 p. (In Russ.)

9. Golovanchikov A.B., Prokhorenko N.A., Merentsov N.A., Dul'kin T.A. *Programma dlya rascheta tekhnologicheskikh i ekonomicheskikh parametrov i optimal'nogo dia-metra truboprovoda dlya perekachivaniya zhidkostey i gazov* [Program for calculating the technological and economic parameters and the optimal diameter of the pipeline for pumping liquids and gases], Russian Federation, 2019, Certificate of state registration of computer programs No. 2019615073. (In Russ.)

Optimierung der technologischen Parameter und des Rohrdurchmessers unter Berücksichtigung der Energie- und Ressourcenschonung

Zusammenfassung: Es ist ein Algorithmus zur Berechnung des optimalen Durchmessers einer Rohrleitung und ihrer technologischen Parameter unter Berücksichtigung der mit dem Hydraulikwiderstand verbundenen Energiekosten, der Abschreibungsabzüge für Kapitalkosten und des Betriebskapitals für Betrieb und Reparatur beschrieben. Es werden Beispiele für Berechnungen für Gas- und Ölpipelines und Polymerlösungen mit turbulenten, Übergangs- und laminaren Strömungen von Flüssigkeiten und Gas angegeben. In jedem Fall wird abhängig von der Reynolds-Zahl der Widerstandskoeffizient für hydraulisch glatte Röhre in den Berechnungen ausgewählt oder nach den bekannten Nikuradze-und Blasius-Formeln oder dem selbstmodellierten Strömungsregime unter Berücksichtigung der Rauheit berechnet. Es ist gezeigt, dass die erforderliche Leistung der Pumpe oder des Kompressors in Abhängigkeit von den obigen Strömungsregimen vom Durchmesser der Rohrleitung abhängt, d_t^{-4} - für laminare Strömung, $d_t^{-4,75}$ - für Übergangsströmungsregime und d_t^{-5} - für turbulente Strömung.

Optimisation des paramètres technologiques et du diamètre du pipeline compte tenu des économies d'énergie et de ressources

Résumé: Est donnée la description de l'algorithme du calcul du diamètre optimal de la canalisation et de ses paramètres technologiques compte tenu des coûts énergétiques liés à la résistance hydraulique, des amortissements sur les dépenses de capital et des fonds de roulement pour l'exploitation et la réparation. Sont cités des exemples des calculs pour un gazoduc, un oléoduc et une solution de polymère, avec des courants circulaires, transitoires et laminaires des liquides et du gaz. Dans chaque cas, en fonction du nombre de Reynolds, est choisi le coefficient pour les calculs de a résistance des tubes hydrauliques lisses ou bien calculé selon les formules connues de Nikuradze et Blasius ou le mode de courant automatique en tenant compte de la rugosité. Est démontré que la puissance requise de la pompe ou du compresseur en fonction des modes d'écoulement ci-dessus dépend du diamètre de la conduit d_t^{-4} – pour l'écoulement luminaire $d_t^{-4,75}$ – pour le mode d'écoulement transitoire et d_t^{-5} – pour l'écoulement turbulent.

Авторы: ***Головачников Александр Борисович*** – доктор технических наук, профессор кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств»; ***Дулькин Тимофей Александрович*** – студент, ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов», г. Москва, Россия; ***Прохоренко Наталья Андреевна*** – аспирант кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств»; ***Меренцов Николай Анатольевич*** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств», ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград, Россия.

Рецензент: ***Гермашев Илья Васильевич*** – доктор технических наук, профессор кафедры «Фундаментальная информатика и оптимальное управление», ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный университет», г. Волгоград, Россия.

УДК 05.13.18
DOI: 10.17277/vestnik.2020.01.pp.100-105

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПЫЛА КОМПОНЕНТОВ СМЕСИ В ЦЕНТРОБЕЖНОМ АППАРАТЕ

А. Е. Лебедев[1], А. А. Ватагин[1], Д. В. Лебедев[2], И. С. Гуданов[1]

Кафедры: «Технологические машины и оборудование» (1), lae4444@mail.ru; «Автомобильный транспорт» (2),
ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», г. Ярославль, Россия

Ключевые слова: дисперсный поток; коэффициент неоднородности; сегрегация компонентов; смешение; угол рассеивания; функция распределения.

Аннотация: Рассмотрен метод снижения влияния сегрегации на смешение компонентов путем подготовки компонентов посредством измельчения частиц. Представлена конструкция нового смесительного устройства и математическая модель процесса формирования дисперсного потока частиц при смешении, позволяющая оценить его структуру, что необходимо при проектировании новых смесителей, работающих на принципе взаимодействия струйных потоков.

Одним из способов снижения негативного влияния сегрегации на однородность смеси сыпучих сред является выравнивание размеров частиц компонентов перед смешением путем предварительного измельчения частиц одного из материалов (имеющего бóльший размер частиц) до определенного размера, при котором интенсивность сегрегации, вызванной различием в размерах частиц уменьшается, а сам процесс смешения ускоряется [1]. Данный способ может быть использован практически во многих технологических процессах, где допускается проведение предварительного измельчения, то есть разрушение частиц.

Для реализации предложенного способа разработан центробежный смесительный аппарат [2], в котором совмещены ступени смешения и предварительного измельчения одного из компонентов (рис. 1).

При работе устройства один из компонентов, частицы которого имеют бóльший размер, поступает внутрь корпуса *3* через устройство загрузки *1* на вращающийся ротор *4*, захватывается лопастями измельчителя *5* с самофутеровочными карманами *6*, разгоняется, распыляется, а сформированный поток ударяется об отбойные элементы *17*, где они измельчаются до требуемого размера (близкого к размеру частиц второго компонента). Ротор измельчителя вращается от привода *9*. Размер получаемых частиц регулируется скоростью удара об отбойные элементы. Частицы измельченного материала уносятся восходящим потоком, создаваемым воздушным классификатором *7*, в верхнюю часть корпуса, откуда попадают через воронку *19* на нижнюю поверхность вращающегося дискового распылителя *11*, насаженного на вал *10*, где захватываются лопастями *12* и распыляются. Одновременно с этим на верхнюю поверхность вращающегося дискового распылителя *11* подается второй компонент через патрубок *15*, захватывается лопастями *13* и распыляется. Вращение дискового распылителя *11* происходит от привода *14*.

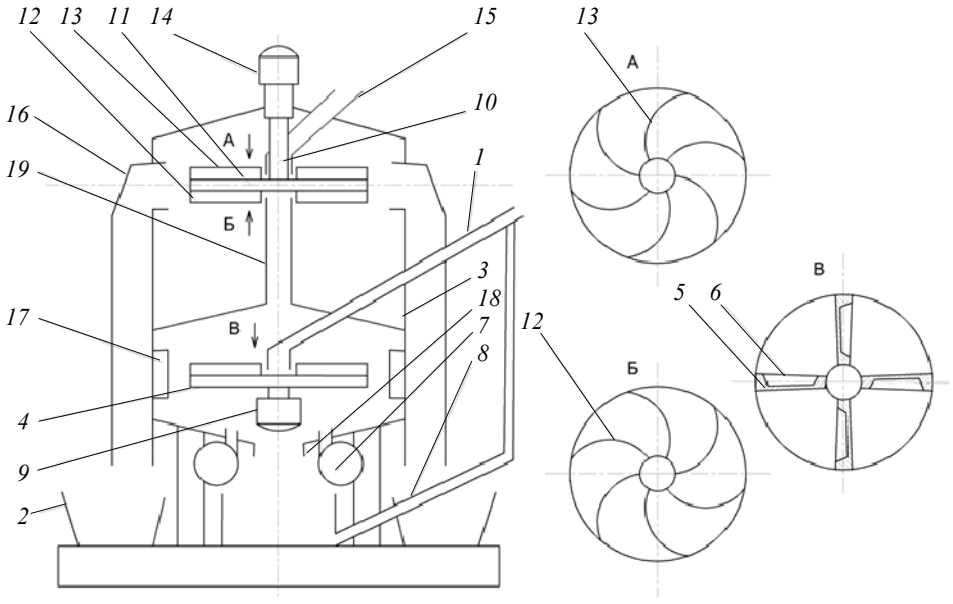


Рис. 1. Схема центробежного смесительного аппарата

Дисперсные потоки частиц обоих компонентов пересекаются, при этом подбираются такие условия, при которых происходит равномерное распределение частиц одного компонента в другом, то есть происходит формирование смеси. Приготовленная таким образом смесь попадает в цилиндрическую рубашку для выгрузки смеси *16*, далее движется по ней в емкость для выгрузки готовой смеси *2*. В целях предотвращения разделения смеси при движении по цилиндрической рубашке *16* в ее внутреннем объеме могут быть расположены делители потока.

Частицы первого компонента, размер которых больше требуемого через патрубок выгрузки не измельченного материала *18*, попадают в устройство для возврата *8*, а из него в устройство загрузки *1*. Устройство возврата неизмельченного материала представляет собой транспортную систему шнекового или ленточного типа.

Таким образом, в данном аппарате за счет предварительного измельчения частиц одного из компонентов удается осуществить смешение склонных к сегрегации материалов за счет, практически, полного исключения сегрегации по размерам.

С целью расчета основных конструктивных и режимных параметров процесса смешения и выявления рациональных режимов работы устройства разработано математическое описание основной фазы процесса смешения – формирования дисперсного потока при центробежном распыливании частиц. Структуры получаемых потоков и их взаимное расположение будут оказывать наибольшее влияние на однородность формируемой смеси в данной конструкции смесителя.

Ввиду огромного числа факторов, влияющих на процесс образования потока, применение детерминированных методов затруднительно, поэтому в основу описания положен стохастический подход [3], позволяющий описать наиболее вероятную структуру потока.

Согласно исследованиям [1, 3] фазовый объем $d\Gamma$ целесообразно представить в виде произведения

$$d\Gamma = dvdD, \quad (1)$$

что соответствует механизму формирования потока. Здесь где v – случайная скорость частицы; D – случайное значение диаметра частицы.

Принимая во внимание расширяющуюся форму создаваемого потока, данное выражение запишем в виде

$$d\Gamma = dv_x dv_y dD = v_x \cos^{-2}\varphi dv_x d\varphi dD, \tag{2}$$

где v_x, v_y – проекции случайной скорости на горизонтальную и вертикальную оси соответственно; φ – угол рассеивания (угол между вектором скорости и горизонтальной осью).

Распределение числа частиц в $d\Gamma$ согласно стохастическому подходу будет иметь вид

$$dN = A\exp\left(-\frac{E}{E_0}\right)d\Gamma. \tag{3}$$

где A – нормировочная постоянная; E_0 – энергетическая константа ; E – стохастическая энергия частицы.

Стохастическую энергию частицы E при моделировании удобно представить в виде только одной составляющей – поперечного движения частиц в потоке, которая оказывает результирующее влияние на распределение частиц в сечении потока

$$E = m(v_x \operatorname{tg}\varphi)^2 / 2. \tag{4}$$

где m – масса частицы.

Для перехода к безразмерным величинам введем обозначения:

$$w = \frac{v_x}{v_0}, \quad Д = \frac{D}{D_0}, \quad \Phi = \frac{\varphi}{\varphi_0}. \tag{5}$$

Тогда дифференциальную функцию распределения числа твердых частиц движущегося потока по углам рассеивания представим выражением

$$f(\Phi) = \frac{1}{N} 0{,}75\, p_1 (q_1 - 2q_2). \tag{6}$$

Величины q_1, q_2, входящие в (6), определяются из выражений:

$$\begin{aligned} q_1 &= A\left(p_2\left[\exp\left\{p_3 w_{\min}^2\right\} - \exp\left\{p_3 w_{\max}^2\right\}\right] + 12E_0\left[\exp\left\{p_3 w_{\min}^2\right\} - \exp\left\{p_3 w_{\max}^2\right\}\right]\right) p_4; \\ q_2 &= A_1\left(p_2\left[\exp\left\{p_3 w_{\max}^2\right\} - \exp\left\{p_3 w_{\min}^2\right\}\right] + 16E_0\left[\exp\left\{p_3 w_{\max}^2\right\} - \exp\left\{p_3 w_{\min}^2\right\}\right]\right) p_5; \end{aligned} \tag{7}$$

величины $p_1 - p_4$ по формулам:

$$\begin{aligned} p_1 &= \left(v_0 \pi \rho \cos^2 \varphi_0 \Phi D_0^3 \operatorname{tg}^2 \varphi_0 \Phi\right)^{-1}; \\ p_2 &= D_0^3 \pi \rho v_0^2 \operatorname{tg}^2 \varphi_0 \Phi; \\ p_3 &= -\frac{1}{12} v_0^2 \operatorname{tg}^2 \varphi_0 \Phi \pi \rho D_0^3 E_0^{-1}; \\ p_4 &= Д_{\max}^2 - Д_{\min}^2; \\ p_5 &= Д_{\max} - Д_{\min}. \end{aligned} \tag{8}$$

Таблица 1

Сравнение опытных и расчетных данных

Частота вращения, мин$^{-1}$	Объемное соотношение	Значение коэффициента неоднородности смеси V_c, %	
		опытное	расчетное
800	1:1	6,3	6,52
900		4,6	4,64
800	1:2	3,9	4,22
900		2,8	2,61

Составив для каждого компонента смеси выражения, описывающие структуру потока в поперечном сечении, и приравнивая параметры распределений, можно подобрать такие режимные и конструктивные параметры распыливающего узла, которые обеспечат наиболее полное наложение распределений, что необходимо для получения однородной смеси в смесителях, работающих по данному принципу.

Выражения (6) – (8) позволяют описать распределение частиц в потоках и вычислить с использованием методик, представленных в [4, 5], значения коэффициента неоднородности смеси.

Для проверки адекватности полученных зависимостей проведен цикл опытных исследований, в которых в качестве модельных материалов использовались гречневая крупа (первый смешиваемый компонент, частицы которого крупнее) и манная.

В первой части опытов проводилось смешение без предварительного измельчения гречневой крупы. В опытах частота вращения ротора смесительного устройства изменялась в пределах 300…1000 мин$^{-1}$, объемное соотношение гречневой крупы к манной изменялось от 1:5 до 1:1. Значения коэффициента неоднородности смеси во всех опытах находились в пределах 23 – 36 %. Такие высокие значения объясняются интенсивной сегрегацией материалов, как в процессе смешения, так и при выгрузке.

Во второй части опытов частицы гречневой крупы измельчались до размеров, близких к размерам частиц манной крупы. Параметры процесса измельчения, следующие: частота вращения ротора 1500 мин$^{-1}$, диаметр ротора 150 мм, расстояние от края ротора до отбойных элементов – 100 мм.

Далее осуществлялось их смешение с манной крупой при частотах вращения ротора смесительного устройства 300…1000 мин$^{-1}$ и объемных соотношениях смешиваемых материалов от 1:5 до 5:1. Минимальное значение коэффициента неоднородности смеси 2,8 % получено при частоте вращения 900 мин$^{-1}$ и объемном соотношении модельных компонентов 1:2.

Фрагмент сравнения результатов опытов по смешению вышепредставленных модельных материалов с расчетными значениями, полученными с использованием выражений (6) – (8) и методики нахождения коэффициента неоднородности смеси при взаимодействии дисперсных потоков [4, 5], представлен в табл. 1.

Анализируя результаты сравнения можно сделать вывод о том, что в диапазоне изменения частоты вращения смесительного устройства 500…1200 мин$^{-1}$ и объемных соотношениях от 1:5 до 5:1 полученные зависимости адекватно описывают опытные данные и могут быть использованы при создании инженерной методики расчета проектировании смесителей данного типа.

Список литературы

1. Аппараты для переработки дисперсных сред. Теория и расчет / А. Е. Лебедев, А. И. Зайцев, А. Б. Капранова [и др.]. – Ярославль : Издат. дом Ярославского гос. техн. ун-та, 2017. – 175 с.

2. Пат. 2622667 Российская Федерация, МПК B02C 7/00, B02C 13/00, B01F 7/00. Устройство для смешения и измельчения дисперсных материалов / А. Е. Лебедев, А. И. Зайцев, С. Суид, В. В. Власов, А. А Ватагин, Д. В. Лебедев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет». – № 2016121524 ; заявл. 31.05.2016 ; опубл. 19.06.2017, Бюл. № 17. – 5 с.

3. Лебедев, А. Е. К расчету стохастической энергии при моделировании структуры расширяющихся дисперсных потоков. – Текст : электронный / А. Е. Лебедев, Д. В. Лебедев, М. Н. Романова // Инженерный вестник Дона : электрон. науч. журнал. – 2018. – № 4. – URL : http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5268 (дата обращения: 13.11.2018).

4. Лебедев, А. Е. Метод оценки коэффициента неоднородности смесей сыпучих сред. – Текст : электронный / А. Е. Лебедев, А. И. Зайцев, А. А. Петров // Инженерный вестник Дона : электрон. науч. журнал. – 2014. – № 4. – URL : ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2556 (дата обращения: 13.11.2018).

5. Метод определения коэффициента неоднородности смеси при взаимодействии разреженных потоков / А. Е. Лебедев, А. И. Зайцев, А. Б. Капранова, А. А. Петров // Известия высш. учеб. заведений. Серия: Химия и хим. технология. – 2012. – Т. 55, № 11. – С. 119 – 121.

Mathematical Description of the Process of Spraying the Components of the Mixture in a Centrifugal Apparatus

A. E. Lebedev[1], A. A. Vatagin[1], D. V. Lebedev[2], I. S. Gudanov[1]

Departments of Process Machines and Equipment (1), lae4444@mail.ru;
Automobile Transport (2),
Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia

Keywords: dispersed stream; heterogeneity coefficient; component segregation; mixing; scattering angle; distribution function.

Abstract: A method for reducing the effect of segregation on the mixing of components by preparing the components by grinding particles is considered. The design of a new mixing device and a mathematical model of the process of forming a dispersed particle stream during mixing are presented. This allows one to evaluate its structure, which is necessary when designing new mixers working on the principle of interaction of jet streams.

References

1. Lebedev A.Ye., Zaytsev A.I., Kapranova A.B., Vatagin A.A., Suid S. *Apparaty dlya pererabotki dispersnykh sred. Teoriya i raschet* [Apparatus for processing dispersed media. Theory and calculation], Yaroslavl: Izdatel'skiy dom Yaroslavskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2017, 175 p. (In Russ.)

2. Lebedev A.Ye., Zaytsev A.I., Suid S., Vlasov V.V., Vatagin A.A, Lebedev D.V. *Ustroystvo dlya smesheniya i izmel'cheniya dispersnykh materialov* [Device for mixing and grinding dispersed materials], Russian Federation, 2016, Pat. 2622667. (In Russ.)

3. http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5268 (accessed 13 November 2018).

4. http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2556 (accessed 13 November 2018).

5. Lebedev A.Ye., Zaytsev A.I., Kapranova A.B., Petrov A.A. [A method for determining the coefficient of heterogeneity of a mixture during the interaction of rarefied flows], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [Proceedings of higher educational institutions. Series: Chemistry and Chemical Technology], 2012, vol. 55, no. 11, pp. 119-121. (In Russ.)

Mathematische Beschreibung des Sprühvorgangs der Komponenten der Mischung in einem Zentrifugalapparat

Zusammenfassung: Es ist eine Methode zur Verringerung der Auswirkung der Segregation auf das Mischen von Komponenten durch Herstellung der Komponenten mittels Mahlen von Partikeln untersucht. Es sind das Design einer neuen Mischvorrichtung und ein mathematisches Modell des Prozesses der Bildung eines dispergierten Partikelstroms während des Mischens vorgestellt, mit dessen Hilfe seine Struktur bewertet werden kann, was bei der Entwicklung neuer, nach dem Prinzip der Wechselwirkung von Strahlströmen arbeitender Mischer notwendig ist.

Description mathématique du procédé de la pulvérisation des composants du mélange dans l'appareil de contrôle

Résumé: Est envisagée une méthode de la réduction de l'effet de la ségrégation sur le mélange des composants en préparant les composants par broyage. Sont présentés la conception du nouveau mélangeur et le modèle mathématique du processus de formation du flux dispersé des particules lors du mélange ce qui permet d'évaluation de sa structure nécessaire pour la conception de nouveaux mélangeurs fonctionnant sur le principe de l'interaction des flux de jet.

Авторы: ***Лебедев Антон Евгеньевич*** – доктор технических наук, доцент кафедры «Технологические машины и оборудование»; ***Ватагин Александр Александрович*** – аспирант кафедры «Технологические машины и оборудование»; ***Лебедев Дмитрий Владимирович*** – ассистент кафедры «Автомобильный транспорт»; ***Гуданов Илья Сергеевич*** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технологические машины и оборудование», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», г. Ярославль, Россия.

Рецензент: ***Капранова Анна Борисовна*** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая механика и сопротивление материалов», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», г. Ярославль, Россия.

УДК 536.24
DOI: 10.17277/vestnik.2020.01.pp.106-117

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В БЛОЧНОМ МИКРОКАНАЛЬНОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ

Е. А. Максимова[1], А. А. Маркова[2], А. В. Маркова[1]

Кафедра процессов и аппаратов химической технологии (1), кафедра высшей математики (2), markov-av@yandex.ru; ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный химико-фармацевтический университет», г. Санкт-Петербург, Россия

Ключевые слова: блочный теплообменник; вычислительный эксперимент; математическое моделирование; микроканал; теплоноситель; эффективность.

Аннотация: Теоретическим путем с использованием метода вычислительного эксперимента исследовано влияние конструктивных и режимных параметров на эффективность противоточного микроканального блочного теплообменника для нагрева жидкости жидкостью. Определены условия, при которых наряду с высокими показателями эффективности теплообменника достигается равномерность температурного поля на выходе из канала. Показано, что при малом термическом сопротивлении теплоотдаче обоих теплоносителей эффективность теплообменника не зависит от скоростей теплоносителей и монотонно возрастает с увеличением длины канала. При малом термическом сопротивлении нецелевого теплоносителя заданная эффективность теплообменника соответствует определенному сочетанию значений параметров «скорость нецелевого теплоносителя – длина канала». Соответственно может быть выбрана пара значений параметров, при которой обеспечивается минимум гидравлического сопротивления канала теплообменника.

Введение

В настоящее время в фармацевтической промышленности и биотехнологии все увеличивающееся распространение находят микроканальные теплообменники, которые используются как в лабораторной практике, так и в установках малой производительности и микрореакторной технике при синтезе активных фармацевтических субстанций и полупродуктов [1 – 3].

Теоретический анализ микротеплообменников представлен во множестве научных работ. Установлено, что теплоотдача в канале тесно связано с его геометрическими характеристиками [4 – 7]. Оптимальная форма поперечного сечения канала (прямоугольная, трапециевидная, треугольная) или оптимальная организация расположения каналов (количество и взаимное расположение ходов) устанавливались на основе анализа интенсивности теплоотдачи в каналах и гидравлического сопротивления канала или сети каналов. Однако полученные при этом выводы справедливы лишь применительно к рассматриваемым конструкциям.

Освоение новых технологий изготовления микроканалов приводит к появлению различных видов микротеплообменных устройств [8] и ставит задачу их теоретического исследования.

Блочные теплообменники представляют собой массивный блок, внутри которого выполнены цилиндрические каналы для прохода горячего и холодного теплоносителей. В отличие от тонких стенок, при теплопередаче в блоках следует учитывать продольную теплопроводность и теплосодержание самого блока.

Цель работы – установить зависимости эффективности стального блочного микроканального теплообменника для нагрева (охлаждения) жидкости жидкостью от конструктивных и режимных параметров – длины канала и скорости теплоносителей.

Геометрическая и математическая модели устройства и их реализация

Объектом исследования является блочный микроканальный теплообменник из нержавеющей стали. Цилиндрические каналы для горячего и холодного теплоносителей располагаются в два ряда и чередуются в шахматном порядке. Следовательно, для моделирования такой геометрической структуры достаточно рассматривать только одну ячейку, так как теплообменник симметричен, а процесс теплообмена во всех ячейках протекает одинаково (рис. 1). На схеме теплообменнику присвоены следующие геометрические параметры: R – радиус канала; h – высота ячейки, $h = 6R$; b – ширина сегмента ячейки, $b = 2R$; l – длина каналов, $l = nR$, $n = 4…36$.

Исследуемая ячейка содержит три расчетные области: стального корпуса и двух микроканалов (соответственно для горячего и холодного теплоносителей).

Процесс теплообмена внутри каждой расчетной области представлен стационарным уравнением Фурье–Кирхгофа

$$c\rho\left(w_x \frac{\partial t}{\partial x} + w_y \frac{\partial t}{\partial y} + w_z \frac{\partial t}{\partial z} \right) = \lambda\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

где t – температура; x, y, z – декартовы координаты; c – удельная теплоемкость; ρ – плотность; w_x, w_y, w_z – проекции вектора скорости на оси декартовых координат; λ – коэффициент теплопроводности.

В стальном корпусе теплообменника теплота передается теплопроводностью. Поэтому скорость равна нулю: $w_x = w_y = w_z = 0$. Граничными условиями к уравнению (1) являются условия теплоизоляции с окружающей средой на внешних границах и симметрии на границе с соседними ячейками.

Режим течения жидких теплоносителей в микроканалах ламинарный. Поэтому для горячего и холодного теплоносителей устанавливается пуазейлевский профиль скорости

$$w = w_{\max}\left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right], \quad (2)$$

где $w_{\max}$ – скорость движения жидкости вдоль оси канала; r – расстояние от точки до оси канала.

Для теплоносителя в микроканале граничным условием на входе является условие Данквертса

$$\lambda \frac{\partial t}{\partial n} = (t - t_{\text{н}})\, c\, \rho\, w\mathbf{n}, \quad (3)$$

где $\mathbf{n}$ – единичный вектор, направленный вдоль канала.

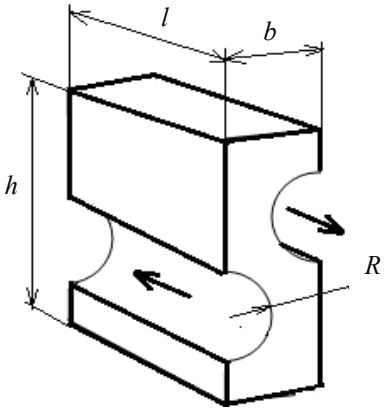


Рис. 1. Схема ячейки блочного теплообменника

Граничным условием для теплоносителя на выходе из канала является равенство нулю теплового потока. Введенные условия позволяют повысить точность расчета и сократить вычислительные затраты. На боковых стенках каналов жидкость находится в идеальном тепловом контакте со стальной матрицей, что означает равенство температур и тепловых потоков. Численное решение построенной математической модели выполнено с использованием программного продукта Comsol Multiphysics 5.3 [9]. Вычислительная процедура предусматривала возможность исследования влияния различных факторов (относительной скорости теплоносителей, длины и радиуса канала) на эффективность работы теплообменника. Выведены формулы для расчета средних температур жидкостей на выходе из каналов.

В качестве модельных жидкостей использовалась вода. Теплофизические свойства теплоносителя (плотность, теплоемкость, теплопроводность) представлялись в виде полиномиальных зависимостей от температуры.

Допустим в первом случае, что теплообменник используется для нагрева холодного теплоносителя. Эффективность микроканального теплообменника по нагреваемому (холодному) теплоносителю можно оценить по формуле [10, 11]

$$E = \frac{t_{2к} - t_{2н}}{t_{1н} - t_{2н}}, \qquad (4)$$

где $t_{2к}$ – средняя температура холодного теплоносителя на выходе из канала; $t_{2н}$, $t_{1н}$ – начальные температуры холодного и горячего теплоносителей соответственно.

Расчетная сетка создавалась пользователем, что позволяло изменять ее шаг. Вблизи стенок канала шаг сетки уменьшался. Сходимость вычислений устанавливалась по значениям температур теплоносителей на выходе из каналов (табл. 1). Расчеты проводились для противотока при $R = 50$ мкм, $l = 4R$, $w_{1max} = w_{2max} = 0{,}35$ м/с.

В случае грубых сеток наблюдается расхождение между значениями средних температур на выходе из каналов. Начиная с сетки № 3, температуры совпадают, поэтому основные расчеты выполнены с ее использованием.

Приняты следующие значения параметров теплообменника: R = 50 мкм; $h = 6R$ = 300 мкм; $b = 2R$ = 100 мкм; длина теплообменника варьировалась в пределах: $l = 4R…36R$ = 200…1800 мкм. Параметры теплоносителей: начальные температуры холодного и горячего теплоносителей соответственно 300 и 370 К; скорости холодного и горячего теплоносителей на оси канала варьировались соответственно в пределах: $w_{2max} = 0{,}010…0{,}15$ м/с и $w_{1max} = 0{,}01…0{,}35$ м/с.

Таблица 1

Расчетные значения средних температур теплоносителей на выходе из каналов в зависимости от размера элементов сетки

Номер сетки	Размер элемента сетки, мкм	Максимальный размер элемента у стенок канала, мкм	Средняя температура теплоносителя на выходе из канала, К	
			холодного	горячего
1	16,2…90	20	317,50	352,50
2	8,4…45	10	317,52	352,48
3	5,4…30	10	317,52	352,49
4	3…24	5	317,52	352,49
5	1,2…16,5	3	317,52	352,49

Предваряя анализ полученных результатов, следует отметить, что параметризация размеров теплообменника позволяет проводить расчеты для геометрически подобных структур разного масштаба. Так, для R = 50, 75, 150 мкм при сохранении гидродинамического подобия (Re = 16,71 для холодного и Re = 57,77 – горячего теплоносителей на входе в каналы) средние температуры теплоносителей на выходе из каналов получались одинаковыми (328,98 К для холодного и 340,77 К для горячего теплоносителя). Следовательно, можно говорить о подобии температурных полей, наблюдаемых в подобных условиях. Таким образом, физические закономерности, установленные на основании решения настоящей задачи, будут справедливы при анализе работы тепловых устройств различного назначения при условии их физического и геометрического подобия рассматриваемой конструкции.

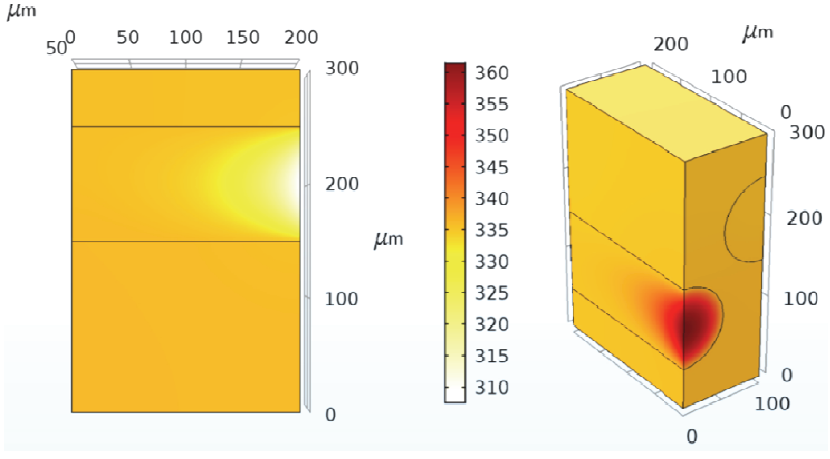
Анализ полученных результатов при равных скоростях теплоносителей

На первом этапе исследований скорости движения теплоносителей в горячем и холодном каналах считали равными: $w_{max} = w_{1max} = w_{2max}$ = 0,01…0,15 м/с; l/R = 4…36.

Рассчитанные температурные поля для наименьших и наибольших скоростей и длин каналов из указанного выше диапазона представлены на рис. 2.

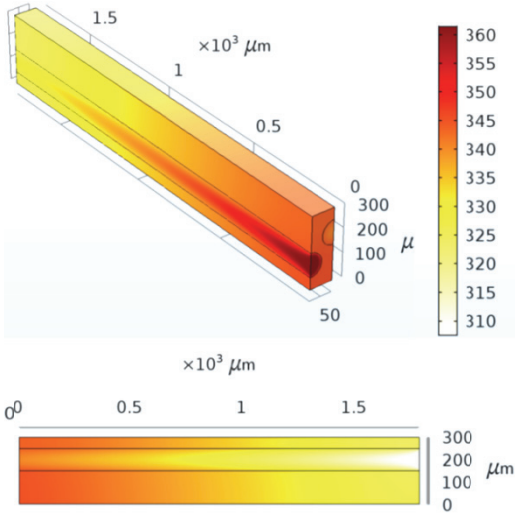
При малых скоростях теплоносителей и малой длине канала изменение температур теплоносителей незначительно (см. рис. 2, *а*). На выходе из канала температуры практически одинаковы по его сечению и примерно равны температуре стального блока. В стальном блоке практически отсутствует температурный градиент. Расчеты показывают, что средняя по объему температура блока равна средней арифметической между входными температурами теплоносителей: $(T_{н1} + T_{н2})/2 = = (300 + 370)/2 = 335$ К.

При высокой скорости и большой длине канала (см. рис. 2, *б*) разность температур между входом и выходом для обоих теплоносителей гораздо больше, чем в предыдущем случае. В выходных сечениях присутствует температурный градиент. Неравномерность температуры на выходе усиливается с увеличением скорости теплоносителя. Это необходимо учитывать при подаче потока на следующее технологическое микроустройство. И, наконец, в длинном стальном блоке имеет место собственный (продольный) температурный градиент.



а)

Рис. 2. Температурные поля в блочном теплообменнике (начало):
а – при w_{max} = 0,01 м/с и l/R = 4;



б)

Рис. 2. Окончание: *б* – w_{max} = 0,15 м/с и l/R = 36

Однако и в этом случае средняя по объему температура блока равна средней арифметической между входными температурами теплоносителей (см. рис. 2, *б*). Отмеченное справедливо, когда физические свойства теплоносителей близки, а также равны произведения расходов теплоносителя на теплоемкость (G_1c_1 = = G_2c_2). Эффективности теплообменного аппарата по холодному и горячему теплоносителям в данном случае также равны между собой.

На рисунке 3 приведены зависимости показателя эффективности теплообмена от относительной длины канала при различных, равных друг другу, значениях скоростей в каналах. Анализируя данные, блочные теплообменники можно разделить на две группы.

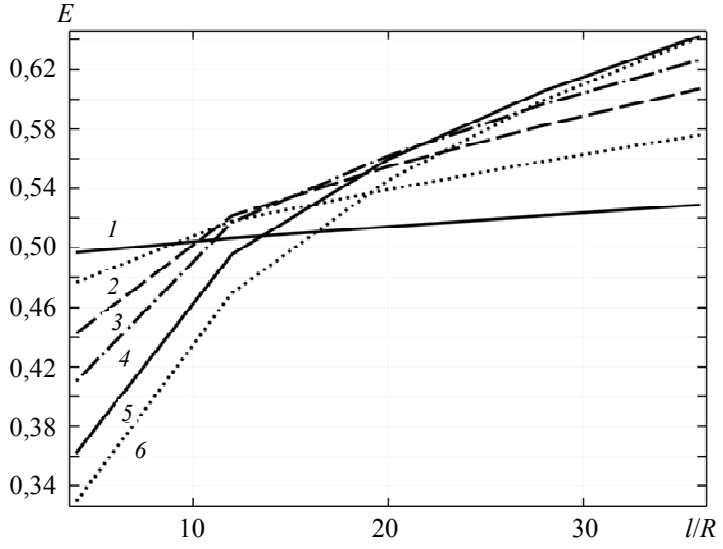


Рис. 3. Графики зависимостей показателя эффективности микротеплообменника от относительной длины канала w_{max} при различных скоростях теплоносителей, м/с:
1 – 0,01; *2* – 0,03; *3* – 0,05; *4* – 0,07; *5* – 0,11; *6* – 0,15

1. Устройства с короткими каналами: $l/R < 12…17$. Эффективность устройства невелика и увеличивается с уменьшением скорости, приближаясь к 0,5. Несмотря на увеличение интенсивности теплоотдачи с увеличением скорости теплоносителя, снижение эффективности теплообменника объясняется тем, что в коротких каналах температура жидкости вблизи стенок канала высокая, а в центре потока – низкая. Усредненная по сечению канала выходная температура оказывается невысокой.

2. Устройства с длинными каналами: $l/R > 12…17$. С ростом скорости эффективность теплообменника возрастает, так что при $l/R \to \infty \quad E \to 1$.

При увеличении скорости уменьшается сопротивление конвективной теплоотдаче. Начиная с некоторого значения скорости, процесс будет лимитироваться термическим сопротивлением блока, и дальнейшее повышение скорости не будет оказывать влияния на интенсивность теплопередачи (см. рис. 3, кривые *3 – 6*).

При низких скоростях теплоносителей термические сопротивления сравнимы между собой, интенсивность теплопередачи низкая и эффективности малы (см. рис. 3, кривые *1*, *2*).

Таким образом, однородность по сечению канала температур теплоносителей можно обеспечить при малых скоростях в коротких теплообменниках. Однако при этом низкой оказывается эффективность теплообменника, и для увеличения расхода целевого (в нашем случае, холодного) теплоносителя необходимо увеличивать число каналов, то есть поперечный размер устройства.

Однородная по сечению температура теплоносителя будет достигаться при больших скоростях в длинных теплообменниках. Стремление увеличить эффективность устройства приводит в данном случае к необходимости увеличения длины канала, а, следовательно и продольного размера устройства. Для миниатюрных устройств последнее может быть нежелательным. Гидравлическое сопротивление канала также увеличивается.

Анализ полученных результатов при различных скоростях теплоносителей

Следующий этап вычислительного эксперимента заключался в изменении относительной скорости теплоносителей. Диапазон изменяемых параметров: w_{1max} = 0,03…0,15 м/с, w_{2max} = = 0,03…0,15 м/с, $l = R(4…20)$ или $l = 200…1000$ мкм.

Результаты расчета эффективности устройства по холодному теплоносителю для некоторых комбинаций скоростей представлены на рис. 4. Кривые *1*, *2* соответствуют меньшему сопротивлению теплоотдачи горячего теплоносителя, *3*, *4* – меньшему сопротивлению теплоотдачи холодного теплоносителя.

Из рисунка 4 (кривые *1*, *2*) видно, что, увеличивая скорость горячего теплоносителя при неизменном l/R, можно значительно повысить эффективность холодного теплоносителя даже при малых скоростях последнего (по сравнению с режимом на рис. 3). В случае низких скоростей горячего теплоносителя и высоких – холодного показатель эффективности устройства по холодному теплоносителю снижа-

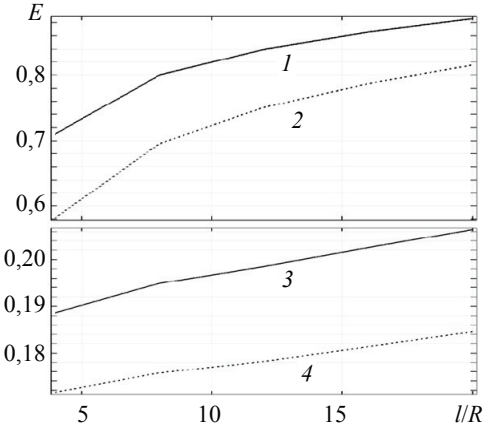


Рис. 4. Графики зависимостей показателя эффективности микротеплообменника от длины канала при различных скоростях теплоносителей, м/с:
1 – $w_{1max} = 0,15$, $w_{2max} = 0,03$;
2 – $w_{1max} = 0,09$, $w_{2max} = 0,03$;
3 – $w_{1max} = 0,03$, $w_{2max} = 0,09$;
4 – $w_{1max} = 0,03$, $w_{2max} = 0,15$

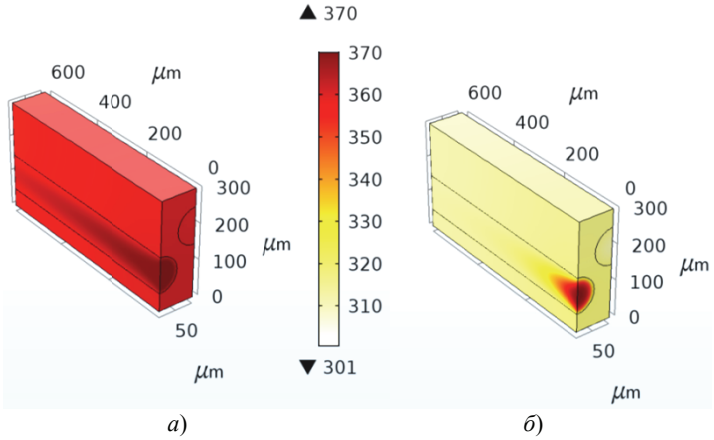
ется (см. рис. 4, кривые *3*, *4*). Однако при этом увеличивается эффективность устройства по горячему теплоносителю, что необходимо учитывать, если задачей теплообмена является охлаждение теплоносителя.

На рисунке 5 показаны температурные поля стального блока со стороны горячего теплоносителя в режимах 1 и 4 (см. рис. 4) при l/R = 12. Низкое сопротивление теплоотдаче горячего теплоносителя приводит к тому, что металлический блок как бы аккумулирует теплоту горячего теплоносителя и передает ее холодному (см. рис. 5, *а*). В результате выходные температуры обоих теплоносителей близки к температуре блока. Из данных рис. 5, *а*, можно также заключить, что в выходном сечении канала холодного теплоносителя температура практически однородна. Обратная картина наблюдается при низком термическом сопротивлении холодного теплоносителя: металлический блок охлажден, выходные температуры близки к температуре блока, температурные градиенты невелики (см. рис. 5, *б*).

Аналогичные закономерности наблюдаются и при других значениях длины канала, в случае, когда скорости теплоносителей различаются между собой в несколько раз. Это означает, что если задачей теплообмена является нагрев, то для достижения однородных температур на выходе и повышения эффективности устройства следует уменьшать сопротивление теплоотдаче со стороны горячего теплоносителя, и, наоборот. Заметим, что чрезмерное уменьшение скорости целевого теплоносителя приводит к уменьшению его расхода, что влечет за собой увеличение числа каналов, а, значит, и поперечного размера устройства.

На рисунке 6 построена зависимость показателя эффективности микротеплообменника по холодному теплоносителю от длины канала при различных относительных скоростях теплоносителей и w_{2max} = 0,03 м/с. Как и следовало ожидать, с увеличением скорости горячего теплоносителя эффективность устройства увеличивается (кривые *1* – *7*). Увеличивается она и с ростом длины канала [12]. Из рисунка 6 следует, что одно и то же значение E соответствует определенной паре значений «скорость – длина».

При данной эффективности бóльшая длина канала микротеплообменника соответствует меньшей относительной скорости. Отметим, что скорость теплоносителя выдвигает требования к микронасосу, а длина микротеплообменника определяется требованием к его компактности.



а) *б*)

Рис. 5. Температурное поле стального блока со стороны горячего теплоносителя:
а – w_{1max} = 0,15 м/с, w_{2max} = 0,03 м/с; *б* – w_{1max} = 0,03 м/с, w_{2max} = 0,15 м/с

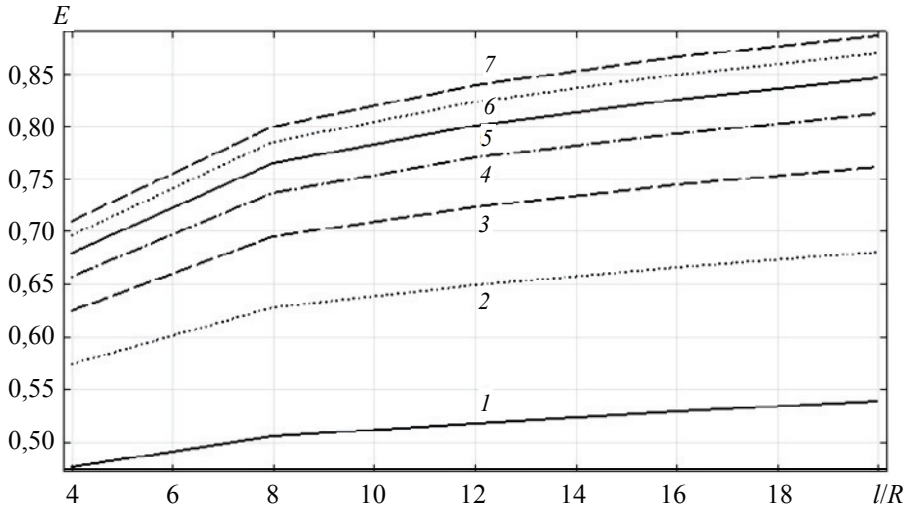


Рис. 6. Графики зависимости показателя эффективности микротеплообменника от длины канала при различных относительных скоростях теплоносителей w_1 / w_2:
1 – 1; *2* – 1,67; *3* – 2,33; *4* – 3; *5* – 3,67; *6* – 4,33; *7* – 5

Оптимальные параметры микротеплообменника

Для определения рабочей области по горячему теплоносителю рассчитаны пары значений w_1 / w_2 и l / R, соответствующие равной эффективности микротеплообменника.

На рисунке 7 построена зависимость гидравлического сопротивления канала горячего теплоносителя от объемного расхода жидкости в канале для фиксированных значений эффективности. Гидравлическое сопротивление, рассчитанное по известной формуле Гагена–Пуазейля, пропорционально произведению скорости теплоносителя на длину канала. Физические свойства жидкости взяты при средней температуре теплоносителя. Большие значения расхода соответствуют меньшей длине канала.

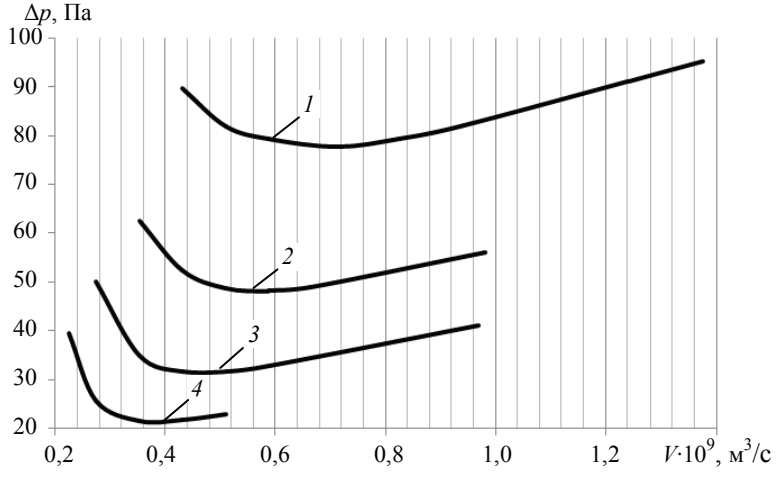


Рис. 7. Графики зависимостей гидравлического сопротивления канала горячего теплоносителя от объемного расхода жидкости в канале при эффективности микроканального теплообменника по нагреваемому теплоносителю *E*:
1 – *E* = 0,85; *2* – *E* = 0,80; *3* – *E* = 0,75; *4* – *E* = 0,70

Из рисунка 7 следует, что стремление увеличить эффективность сопряжено с ростом гидравлического сопротивления канала (кривые *4 – 1*) и для каждого значения эффективности наблюдается минимум гидравлического сопротивления. С ростом эффективности минимум сдвигается в область больших расходов теплоносителя. Так, минимум гидравлического сопротивления горячего канала при E = 0,70 соответствует скорости w_{1max} = 0,11 м/с, l/R = 4,6; при E = 0,75 – w_{1max} = 0,13 м/с, l/R = 5,86; при E = 0,80 – w_{1max} = 0,15 м/с, l/R = 8; при E = 0,85 – w_{1max} = 0,18 м/с, l/R = 11.

В исследованном диапазоне эффективностей (E = 0,70…0,85) пары значений w_{1max}, l/R, соответствующие минимуму гидравлического сопротивления, хорошо аппроксимируются линейной зависимостью: $w_{1max} = 0{,}0106 \cdot l/R + 0{,}00644$.

Полученное выражение определяет оптимальную область параметров горячего теплоносителя. Подобную область можно получить и для холодного теплоносителя, если задачей теплообмена является охлаждение жидкости.

Выводы

Высокая эффективность микротеплообменного устройства с однородной по сечению канала выходной температурой нагреваемой жидкости может быть достигнута двумя способами.

1. Путем увеличения скоростей обоих теплоносителей и увеличения длины канала. При этом термическое сопротивление теплоотдаче будет низким. Вместе с тем скорость теплоносителя не следует увеличивать выше тех значений, при которых термическое сопротивление блока начинает преобладать над термическим сопротивлением теплоносителей. Характерно, что гидравлическое сопротивление каналов с увеличением скорости и длины канала монотонно возрастает.

2. Путем увеличения скорости только нецелевого теплоносителя.

Скорость целевого теплоносителя при этом должна быть в несколько раз меньше скорости нецелевого теплоносителя. Неизбежный результат – увеличение количества каналов и ширины устройства. Необходимая в этом случае длина канала оказывается меньше, чем в предыдущем случае. При заданной эффективности устройства и определенной паре значений «скорость нецелевого теплоносителя – длина канала» гидравлическое сопротивление канала для нецелевого теплоносителя оказывается минимальным.

Установленные количественные характеристики справедливы для рассмотренной конструкции теплообменника в пределах исследованного диапазона изменения влияющих факторов. Качественный анализ закономерностей теплообмена в блочном микроканальном теплообменнике может быть использован при исследовании теплопередачи в микроканальных теплообменниках различной конструкции.

Список литературы

1. Reschetilowski, W. Microreactors in Preparative Chemistry: Practical Aspects in Bioprocessing, Nanotechnology, Catalysis and more / W. Reschetilowski. – Weinheim, Germany : Wiley-VCH, 2013. – 351 p.

2. Боровинская, Е. С. Микроструктурные реакторы – концепции, развитие и применение / Е. С. Боровинская, В. П. Решетиловский // Химическая промышленность. – 2008. – Т. 85, №5. – С. 217 – 247.

3. A Microstructure Heat Exchanger for Quenching the Metabolism of Mammalian Cells / C. Wiendahl, J. J. Brandner, C. Küppers, B. Luo // Chemical Engineering & Technology. – 2007. – Vol. 30, No 3. – P. 322 – 328.

4. Optimization of Micro Heat Exchanger: CFD, Analytical Approach and Multi-Objective Evolutionary Algorithms / K. Foli, T. Okabe, M. Olhofer [et al.] //

International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2006. – Vol. 49, Issues 5-6. – P. 1090 – 1099.

5. Concepts and Realization of Microstructure Heat Exchangers for Enhanced Heat Transfer / J. J. Brandner, E. Anurjew, L. Bohn [et al.] // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2006. – Vol. 30, Issue 8. – P. 801 – 809.

6. Overview of Micro-Channel Design for High Heat Flux Application / N. H. Naqiuddin, L. H. Saw, M. Ch. Yew [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018. – Vol. 82, Part 1. – P. 901 – 914.

7. Vasilev, M. P. Effect of Microchannel Heat Sink Configuration on the Thermal Performance and Pumping Power / M. P. Vasilev, R. Sh. Abiev, R. Kumar // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2019. – Vol. 141. – P. 845 – 854.

8. Metallic Micro Heat Exchangers: Properties, Applications and Long Term Stability. – Текст : электронный / A. Anurjew, E. Hansjosten, U. Schygulla, J. J. Brandner // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2009. – Т. 1, № 5. – URL : https://cyberleninka.ru/article/n/metallic-micro-heat-exchangers-properties-applications-and-long-term-stability (дата обращения: 20.01.2020).

9. Created in COMSOL Multiphysics 5.4. Isothermal MEMS Heat Exchanger. – Текст : электронный // COMSOL. – URL : https://www.comsol.ru/model/nonisothermal-mems-heat-exchanger-516 (дата обращения 19.02.2020).

10. Kakaç, S. Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design / S. Kakaç, H. Liu, A. Pramuanjaroenkij. – New York : CRC Press, 2012. – 632 p.

11. Expanded Microchannel Heat Exchanger: Design, Fabrication and Preliminary Experimental Test / D. C. Denkenberger, M. J. Brandemuehl, J. M. Pearce, J. Zhai // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers – Part A : Journal of Power and Energy. – 2012. – Vol. 226. – P. 532 – 544.

12. Максимова, Е. А. Расчет эффективности блочного микротеплообменника / Е. А. Максимова, А. А. Маркова, А. В. Маркова // Математические методы в технике и технологиях (ММТТ-32) : сб. трудов 32 Междунар. науч. конф., 3 – 7 июня, 2019 г., Санкт-Петербург. – СПб., 2019. – Т. 3. – С. 112 – 114.

Research into Heat Transfer in the Block Microchannel Heat Exchanger

E. A. Maksimova[1], A. A. Markova[2], A. V. Markova[1]

Department of Processes and Apparatuses of Chemical Technology (1), Department of Higher Mathematics (2), markov-av@yandex.ru; Saint-Petersburg State Chemical and Pharmaceutical University, St. Petersburg, Russia

Keywords: block heat exchanger; computational experiment; mathematical modeling; microchannel; coolant; efficiency.

Abstract: Using the method of a computational experiment, the paper presents a theoretical study of the influence of design and operating parameters on the efficiency of a counter-current microchannel block heat exchanger for liquidheating with liquid. The conditions are determined under which, along with high efficiency indicators of the heat exchanger, uniformity of the temperature field at the outlet of the channel is achieved. It is shown that, at low thermal resistance to heat transfer from both heat carriers, the efficiency of the heat exchanger does not depend on the speeds of the heat carriers and monotonically increases with increasing channel length. With low thermal resistance of the non-target coolant, the set efficiency of the heat exchanger corresponds

to a certain combination of parameter values “speed of the non-target coolant – channel length”. Accordingly, a pair of parameter values can be selected at which the minimum hydraulic resistance of the heat exchanger channel is ensured.

References

1. Reschetilowski W. *Microreactors in Preparative Chemistry: Practical Aspects in Bioprocessing, Nanotechnology, Catalysis and more*, Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2013, 351 p.

2. Borovinskaya Ye.S., Reshetilovskiy V.P. [Microstructural reactors – concepts, development and application], *Khimicheskaya promyshlennost'* [Chemical Industry], 2008, vol. 85, no. 5, pp. 217-247. (In Russ.)

3. Wiendahl C., Brandner J. J., Küppers C., Luo B. A Microstructure Heat Exchanger for Quenching the Metabolism of Mammalian Cells, *Chemical Engineering & Technology*, 2007, vol. 30, no 3, pp. 322-328.

4. Foli K., Okabe T., Olhofer M., Jin Y., Sendhoff B. Optimization of Micro Heat Exchanger: CFD, Analytical Approach and Multi-Objective Evolutionary Algorithms, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006, vol. 49, issues 5-6, pp. 1090-1099.

5. Brandner J.J., Anurjew E., Bohn L., Hansjosten E., Henning T., Schygulla U., Wenka A., Schubert K. Concepts and Realization of Microstructure Heat Exchangers for Enhanced Heat Transfer, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2006, vol. 30, issue 8, pp. 801-809.

6. Naqiuddin N.H., Saw L.H., Yew M.Ch., Yusof F., Ching Ng T., Yew M.K. Overview of Micro-Channel Design for High Heat Flux Application, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 82, part 1, pp. 901-914.

7. Vasilev M.P., Abiev R.Sh., Kumar R. Effect of Microchannel Heat Sink Configuration on the Thermal Performance and Pumping Power, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, vol. 141, pp. 845-854.

8. https://cyberleninka.ru/article/n/metallic-micro-heat-exchangers-properties-applications-and-long-term-stability (accessed 20 January 2020).

9. https://www.comsol.ru/model/nonisothermal-mems-heat-exchanger-516 (accessed 19 February 2020).

10. Kakaç S., Liu H., Pramuanjaroenkij A. *Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design*, New York: CRC Press, 2012, 632 p.

11. Denkenberger D.C., Brandemuehl M.J., Pearce J.M., Zhai J. Expanded Microchannel Heat Exchanger: Design, Fabrication and Preliminary Experimental Test, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers – Part A: Journal of Power and Energy*, 2012, vol. 226, pp. 532-544.

12. Maksimova Ye.A., Markova A.A., Markova A.V. *Matematicheskiye metody v tekhnike i tekhnologiyakh (MMTT-32): sbornik trudov 32 Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Mathematical Methods in Engineering and Technology (MMTT-32): proceedings of the 32nd International Scientific Conference], 3 - 7 June, 2019, St. Petersburg, 2019, vol. 3, pp. 112-114. (In Russ., abstract in Eng.)

Untersuchung der Wärmeübertragung im Block - Mikrokanal-Wärmetauscher

Zusammenfassung: Es ist theoretisch unter Verwendung der Methode des Rechnerexperiments der Einfluss von Entwurfs- und Betriebsparametern auf die Effizienz eines Gegenstrom-Mikrokanalblockwärmetauschers zum Erhitzen einer

Flüssigkeit mit Flüssigkeit untersucht. Es sind die Bedingungen festgelegt, unter denen zusammen mit hocheffizienten Indikatoren des Wärmetauschers die Gleichmäßigkeit des Temperaturfeldes am Auslass des Kanals erreicht wird. Es ist gezeigt, dass bei geringem Wärmewiderstand gegen Wärmeübertragung von beiden Wärmeträgern der Wirkungsgrad des Wärmetauschers nicht von den Geschwindigkeiten der Wärmeträger abhängt und mit zunehmender Kanallänge monoton ansteigt. Bei geringem Wärmewiderstand des Nichtzielkühlmittels entspricht der eingestellte Wirkungsgrad des Wärmetauschers einer bestimmten Kombination von Parameterwerten "Geschwindigkeit des Nichtzielkühlmittels – Kanallänge". Dementsprechend kann ein Paar von Parameterwerten ausgewählt werden, bei denen der minimale hydraulische Widerstand des Kanals des Wärmetauschers sichergestellt wird.

Étude du transfert de chaleur dans un échangeur de chaleur micro-canal en bloc

Résumé: Est étudiée théoriquement et avec l'utilisation de la méthode de l'expérience de calcul l'influence des paramètres de construction et de régime sur l'efficacité de l'échangeur à contre-courant micro-canal en bloc pour le chauffage du liquide par liquide. Sont déterminées les conditions dans lesquelles le champ de température à la sortie du canal est uniforme et les performances de l'échangeur thermique sont élevées. Est montré qu'avec une faible résistance thermique à l'effet de deux supports de chaleur, l'efficacité de l'échangeur de chaleur ne dépend pas des vitesses de ces derniers et augmente de manière exponentielle avec l'augmentation de la longueur du canal. En cas de la faible résistance thermique d'un support de chaleur non ciblé, l'efficacité de transfert de la chaleur donnée correspond à une combinaison spécifique des paramètres «vitesse du support de chaleur non ciblé – longueur du canal». En conséquence, il peut y avoir une paire de valeurs de paramètres pour laquelle la résistance hydraulique minimale du canal de l'échangeur de chaleur est assurée.

Авторы: ***Максимова Екатерина Алексеевна*** – магистрант; ***Маркова Анастасия Андреевна*** – ассистент кафедры высшей математики; ***Маркова Алла Валентиновна*** – кандидат технических наук, доцент кафедры процессов и аппаратов химической технологии, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный химико-фармацевтический университет», г. Санкт-Петербург, Россия.

Рецензент: ***Юленец Юрий Павлович*** – доктор технических наук, профессор кафедры системного анализа и информационных технологий, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», г. Санкт-Петербург, Россия.

УДК 517.925.52
DOI: 10.17277/vestnik.2020.01.pp.118-123

SOLUTION OF THE DUFFING EQUATION BY THE POWER SERIES METHOD

A. N. Pchelintsev[1], S. Ahmad[2]

Department of Higher Mathematics (1),
pchelintsev.an@yandex.ru; TSTU, Tambov, Russia;
Department of Mathematics and Statistics (2),
Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan Province, China

Keywords: Duffing equation; power series method; nonlinear oscillator.

Abstract: In this article, the general form of Duffing equation is considered. The power series method is adapted to solve this equation with initial conditions. The convergence theorem of the method of power series is proved.

Introduction

Serious studies of forced nonlinear oscillators appeared early in the 20th century when Georg Duffing (1918) examined mechanical systems with nonlinearities. The Duffing equation is an outstanding nonlinear differential equation makes its presence in lot of problems like physical, engineering and even biological problems. The German electrical engineer Duffing introduced the model of Duffing equation in 1918.

The present article targets to offer an alternative technique of solution to the Duffing equation. By using the power series method, solutions of initial value problem for Duffing Equation were obtained in the form of infinite series. Schovanec and White used the Taylor series expansion method [1]. An analytical approach based on the power series method is proposed for the study of problems involving periodic motion. Qaisi has used the power series approach to solve undamped and unforced Duffing equation [2].

There are a number of computational methods that have been developed for solving the oscillatory problems of nonlinear oscillators, for example, the harmonic balance method, the variation iteration method, the homotopy perturbation method, the parameter-expanding method, the exp-function method, the differential transformmethod, and the optimal scale polynomial interpolation method, the Laplace decomposition methods were introduced by Khuri [3]. Chen [4] has used a target function method to solve Duffing equation. Yusufoglu numerically solved of Duffing equation by the Laplace decomposition algorithm [5]. Recently, Kumar has developed powerful method to solve time-fractional Fokker-Planck equation arising in solid state physics and circuit theory [6] and gas dynamics equation arising in shock fronts [7], telegraph equation via Laplace transform [8].

In our turn, in order to solve the Duffing equation we try to solve this equation by the power series method (PSM). PSM is a classical method to solve ordinary differential equations, which is closely related to the Taylor series method, but does not need an elaborate differential process to derive the expansion coefficients. However, the PSM is not presented as a general purpose algorithm, because it is necessary to derive the corresponding algebraic relation to generate the expansion coefficients case by case.

Mathematical modeling

In this section, we will define a non-linear second order differential equation with initial conditions:

$$\ddot{x} + \delta\dot{x} + \alpha x + \beta x^3 = \gamma\cos\omega t\ ;$$

$$x(0) = p_0\ ;\ \dot{x}(0) = p_1\,,$$

where the values of p_0 and p_1 are set, δ is control the amount of damping, α is control the linear stiffness, β is control the amount of non-linearity in the restoring force; if $\beta = 0$ the Duffing equation is driven simple harmonic oscillator; γ is the amplitude of the periodic driving force; if $\gamma = 0$ the system is without a driving force; ω is angular frequency of the periodic driving force.

The power series of solutions for non-linear equations converge on a small intervals. Therefore the initial time must be transformed in the calculations. Let's write the problem in the general form as:

$$\ddot{x} + \delta\dot{x} + \alpha x + \beta x^3 = \gamma\cos(\omega t + t_0)\ ; \tag{1}$$

$$x(0) = p_0\ ;\ \dot{x}(0) = p_1\,,$$

where t_0 is the initial time, t is the time measured from the moment t_0,

$$\cos(\omega t + t_0) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\left(\cos(\omega t + t_0)\right)^{(i)}\Big|_{t=0}}{i!} t^i\ .$$

Let

$$u_0 = 1\,,\ u_1 = \frac{\omega u_0}{1}\,,\ u_2 = \frac{\omega u_1}{2}\,,\ ...,\ u_i = \frac{\omega u_{i-1}}{i}\,,\ ...$$

hence

$$\cos(\omega t + t_0) = \sum_{i=0}^{\infty} u_i \cos\left(\omega t_0 + \frac{\pi i}{2}\right) t^i\ . \tag{2}$$

A modified power series method

The power series method is a standard and effective tool for solving the Duffing equation. It gives the solution $x(t)$ in the form of a power series

$$x(t) = \sum_{i=0}^{\infty} p_i t^i\ . \tag{3}$$

Then

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=0}^{\infty} (i+1) p_{i+1} t^i = \sum_{i=0}^{\infty} q_i t^i\ , \tag{4}$$

where

$$q_i = (i+1)p_{i+1}.$$

Note that here

$$q_{i+1} = (i+2)p_{i+2}.$$

Then

$$\ddot{x}(t) = \left(\sum_{i=0}^{\infty} q_i t^i\right)' = \sum_{i=0}^{\infty}(i+1)q_{i+1}t^i = \sum_{i=0}^{\infty}(i+1)(i+2)p_{i+2}t^i. \quad (5)$$

Now taking square and cube of (3) we get the following results:

$$x^2 = x\cdot x = \sum_{i=0}^{\infty}\left(\sum_{k=0}^{i} p_k p_{i-k}\right)t^i = \sum_{i=0}^{\infty} r_i t^i;$$

$$x^3 = x^2\cdot x = \sum_{i=0}^{\infty}\left(\sum_{j=0}^{i} r_j p_{i-j}\right)t^i = \sum_{i=0}^{\infty}\left[\sum_{j=0}^{i} p_{i-j}\sum_{k=0}^{j} p_k p_{j-k}\right]t^i. \quad (6)$$

Now using (2) – (6) in equation (1), we get the following result

$$p_{i+2} = -\frac{\delta p_{i+1}}{i+2} - \frac{\beta\sum_{j=0}^{i} p_{i-j}\sum_{k=0}^{j} p_k p_{j-k}}{(i+1)(i+2)} + \frac{\gamma u_i \cos\left(\omega t_0 + \frac{\pi i}{2}\right)}{(i+1)(i+2)}, \quad (7)$$

for $i = 0$ p_2 is expressed through p_0 and p_1.

Note that $i!$ grows faster than ω^i, i.e.

$$\lim_{i\to\infty}\frac{\omega^i}{i!} = 0.$$

Then there exist such the value $i = i^*$, when

$$\frac{\omega^i}{i!} < 1$$

for any $i > i^*$.

We denote by:

$$N_\omega = \max_{i=0,i^*}\frac{\omega^i}{i!} \ge 1;\ \frac{\omega^0}{0!} = 1;$$

$$\left|\cos\left(\omega t_0 + \frac{\pi i}{2}\right)\right| \le 1,\ |u_i| \le N_\omega.$$

Estimating the region of convergence of the power series is important when the integration step is selected.

Let Δt is the integration step,

$$\Delta t \in \left(-\frac{1}{h}; \frac{1}{h}\right),$$

h is some number, which we also define:

$$h_1 = \max\{\,|\,p_0\,|,|\,p_1\,|,1\,\} \ge 1\,;\;\; h_2 = \delta + \beta\left(3h_1^2 + 3h_1 + 1\right) + \gamma N_\omega + 1 \ge 1\,;\;\; h = h_1 h_2 \ge 1\,.$$

Theorem: *The following inequalities are hold*

$$|p_\nu| \le h^\nu\,, \tag{8}$$

where ν *is any natural number.*

Proof. We prove by the method of mathematical induction.

$|p_1| \le h^1$ is obviously.

We assume that (8) is valid for $i = m+1$, m is a natural number. Then it is also valid for any $n = \overline{1,i}$, that is

$$|p_n| \le h^n\,.$$

Note

$$\sum_{j=0}^{i} p_{i-j} \sum_{k=0}^{j} p_k p_{j-k} = p_i p_0^2 + p_0\left(2p_0 p_i + \sum_{k=1}^{i-1} p_k p_{i-k}\right) + \sum_{j=1}^{i-1} p_{i-j} \sum_{k=0}^{j} p_k p_{j-k} =$$

$$= p_i p_0^2 + p_0\left(2p_0 p_i + \sum_{k=1}^{i-1} p_k p_{i-k}\right) + \sum_{j=1}^{i-1} p_{i-j}\left(2p_0 p_j + \sum_{k=1}^{j-1} p_k p_{j-k}\right).$$

We estimate

$$\left|\sum_{j=0}^{i} p_{i-j} \sum_{k=0}^{j} p_k p_{j-k}\right| \le h_1^2 h^i + h_1\left(2h_1 h^i + \sum_{k=1}^{i-1} h^k h^{i-k}\right) + \sum_{j=1}^{i-1} h^{i-j}\left(2h_1 h^j + \sum_{k=1}^{j-1} h^k h^{j-k}\right) =$$

$$= h_1^2 h^i + h_1\left(2h_1 h^i + h^i(i-1)\right) + 2h_1 \sum_{j=1}^{i-1} h^i + \sum_{j=1}^{i-1}\sum_{k=1}^{j-1} h^i = h_1^2 h^i + \left(2h_1^2 + (i-1)h_1\right)h^i +$$

$$+ 2h_1(i-1)h^i + h^i \sum_{j=1}^{i-1}(j-1) = \left(3h_1^2 + (i-1)h_1\right)h^i + 2h_1(i-1)h^i + h^i \frac{0+(i-2)}{2}(i-1) \le$$

$$\le \left(3h_1^2 + 3h_1(i+1) + (i+1)(i+2)\right)h^i \le (i+1)(i+2)\left(3h_1^2 + 3h_1 + 1\right)h^i.$$

Then from (7)

$$|p_{m+2}| \le \frac{\delta|p_{m+1}|}{m+2} + \beta\left(3h_1^2 + 3h_1 + 1\right)h^m + \frac{\gamma|u_m|\left|\cos\left(\omega t_0 + \frac{\pi m}{2}\right)\right|}{(m+1)(m+2)} \le \delta h^{m+1} +$$

$$+ \beta\left(3h_1^2 + 3h_1 + 1\right)h^{m+1} + \gamma N_\omega h^{m+1} \le \left(\delta + \beta\left(3h_1^2 + 3h_1 + 1\right) + \gamma N_\omega + 1\right)h^{m+1} =$$

$$= h_2 h^{m+1} \le h_1 h_2 h^{m+1} = h^{m+2}.$$

Hence proved that

$$|p_\nu| \le h^\nu\,,$$

where ν is any natural number.

The reported study was funded by RFBR for the research project No 20-01-00347.

References

1. Schovanec L., White J.T. A Power Series Method for Solving Initial Value Problems Utilizing Computer Algebra Systems, *International Journal of Computational Mathematics*, 1993, vol. 47, issue 3-4, pp. 181-189.

2. Qaisi M.I. A Power Series Approach for the Study of Periodic Motion, *Journal of Sound and Vibration*, 1996, vol. 196, issue 4, pp. 401-406.

3. Khuri S.A. A Laplace Decomposition Algorithm Applied to a Class of Nonlinear Differential Equations, *Journal of Applied Mathematics*, 2001, vol. 1, issue 4, pp. 141-155.

4. Chen Y.Z. Solution of the Duffing Equation by Using Target Function Method, *Journal of Sound and Vibration*, 2002, vol. 256, issue 3, pp. 573-578.

5. Yusufoglu E. Numerical Solution of Duffing Equation by the Laplace Decomposition Algorithm, *Applied Mathematics and Computation*, 2006, vol. 177, no. 1, pp. 572-580.

6. Kumar S. Numerical Computation of Time-Fractional Fokker-Planck Equation Arising in Solid State Physics and Circuit Theory, *Zeitschrift fur Naturforschung*, 2013, vol. 68a, pp. 777-784.

7. Kumar S., Rashidi M.M. New Analytical Method for Gas Dynamics Equation Arising in Shock Fronts, *Computer Physics Communications*, 2014, vol. 185, issue 7, pp. 1947-1954.

8. Kumar S. A New Analytical Modelling for Telegraph Equation Via Laplace Transform, *Applied Mathematical Modelling*, 2014, vol. 38, issue 13, pp. 3154-3163.

Решение уравнения Дуффинга методом степенных рядов

А. Н. Пчелинцев[1], С. Ахмад[2]

Кафедра «Высшая математика» (1),
pchelintsev.an@yandex.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия;
кафедра математики и статистики (2),
Университет Чжэнчжоу, г. Чжэнчжоу, провинция Хэнань, Китай

Ключевые слова: уравнение Дуффинга; метод степенных рядов; нелинейный осциллятор.

Аннотация: Рассмотрен общий вид уравнения Дуффинга. Метод степенных рядов адаптирован для решения данного уравнения с заданными начальными условиями. Доказана теорема о сходимости метода степенных рядов.

Список литературы

1. Schovanec, L. Power Series Method for Solving Initial Value Problems Utilizing Computer Algebra Systems / L. Schovanec, J. T. White // International Journal of Computational Mathematics. – 1993. – Vol. 47, Issue 3-4. – P. 181 – 189.

2. Qaisi, M. I. A Power Series Approach for the Study of Periodic Motion / M. I. Qaisi // Journal of Sound and Vibration. – 1996. – Vol. 196, Issue 4. – P. 401 – 406.

3. Khuri, S. A. A Laplace Decomposition Algorithm Applied to a Class of Nonlinear Differential Equations / S. A. Khuri // Journal of Applied Mathematics. – 2001. – Vol. 1, Issue 4. – P. 141 – 155.

4. Chen, Y. Z. Solution of the Duffing Equation by Using Target Function Method / Y. Z. Chen // Journal of Sound and Vibration. – 2002. – Vol. 256, Issue 3. – P. 573 – 578.

5. Yusufoglu, E. Numerical Solution of Duffing Equation by the Laplace Decomposition Algorithm / E. Yusufoglu // Applied Mathematics and Computation. – 2006. – Vol. 177, no. 1. – P. 572 – 580.

6. Kumar, S. Numerical Computation of Time-Fractional Fokker-Planck Equation Arising in Solid State Physics and Circuit Theory / S. Kumar // Zeitschrift fur Naturforschung. – 2013. – Vol. 68a. – P. 777 – 784.

7. Kumar, S. New Analytical Method for Gas Dynamics Equation Arising in Shock Fronts / S. Kumar, M. M. Rashidi // Computer Physics Communications. – 2014. – Vol. 185, Issue 7. – P. 1947 – 1954.

8. Kumar, S. New Analytical Modelling for Telegraph Equation Via Laplace Transform / S. Kumar // Applied Mathematical Modelling. – 2014. – Vol. 38, Issue 13. – P. 3154 – 3163.

Lösung der Duffing-Gleichung nach der Potenzreihenmethode

Zusammenfassung: Die allgemeine Form der Duffing-Gleichung ist betrachtet. Die Potenzreihenmethode ist angepasst, um diese Gleichung unter gegebenen Anfangsbedingungen zu lösen. Das Theorem über die Konvergenz der Methode der Potenzreihen ist bewiesen.

Résolution de l'équation de Duffing par la méthode des séries de puissance

Résumé: Est considérée la vue générale de l'équation Duffing. La méthode des séries de puissance est adaptée pour la résolution d'une équation donnée avec des conditions initiales données. Est prouvé le théorème de convergence de la méthode des séries de puissance.

Авторы: ***Пчелинцев Александр Николаевич*** – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой «Высшая математика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; ***Ахмад Саджад*** – аспирант кафедры математики и статистики, Университет Чжэнчжоу, Чжэнчжоу, провинция Хэнань, Китай.

Рецензент: ***Жуковский Евгений Семёнович*** **–** доктор физико-математических наук, профессор, директор научно-исследовательского института математики, физики и информатики, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина», г. Тамбов, Россия.

УДК 744.72
DOI: 10.17277/vestnik.2020.01.pp.124-132

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ЭВТЕКТИЧЕСКОГО СПЛАВА

Р. Х. Дадашев[1,3], Б. Б. Алчагиров[2], Д. З. Элимханов[3], Х. С. Талхигова[1], З. И. Дадашева[1]

Кафедра «Теоретическая физика» (1), raykom50@mail.ru;
ФГБОУ ВО «Чеченский государственный университет»,
г. Грозный, Чеченская Республика;
кафедра «Физика конденсированного состояния» (2),
ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет»,
г. Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика;
Центр проблем материаловедения (3),
ГКНУ «Академия наук Чеченской Республики», г. Грозный, Чеченская Республика

Ключевые слова: адсорбция; десорбция; металлические расплавы; поверхностное натяжение; поверхностное натяжение эвтектического сплава; температурный коэффициент поверхностного натяжения; эвтектика.

Аннотация: Изложены результаты исследования влияния эвтектики на концентрационную зависимость температурного коэффициента поверхностного натяжения (ПН). Сделан критический анализ имеющихся экспериментальных данных по температурной зависимости ПН эвтектических систем. Проведены экспериментальные исследования концентрационной и температурной зависимостей ПН расплавов олово – свинец и индий – свинец. По полученным экспериментальным данным проведены расчеты адсорбции (*N*-вариант по Гуггенгейму – Адаму) поверхностно активного свинца при разных температурах, что дало возможность определить величину десорбции свинца, обусловленную увеличением температуры. По полученным данным установлена функциональная зависимость температурного коэффициента ПН от величины десорбции поверхностно активного компонента. Так, на концентрационной зависимости температурного коэффициента ПН двойных систем олово – свинец и индий – свинец обнаружены аномалии в виде максимума. Показано, что данные особенности вызваны десорбцией поверхностно активного свинца, которая обусловлена повышением температуры.

Эвтектические сплавы и в целом двойные системы с эвтектикой, благодаря своим особым свойствам, давно привлекают внимание ученых. На основании проведенных экспериментальных исследований сделан вывод о присутствии в эвтектическом сплаве различных структур, оказывающих влияние на физико-химические свойства расплавов [1, 2]. Однако в ряде работ для эвтектического сплава получены результаты, соответствующие статистическому распределению разнородных атомов [3, 4], и на концентрационной зависимости физико-хими-

ческих свойств не обнаружены аномалии в области эвтектики. Критический анализ этих работ дается в монографии [5], откуда видно, что дискуссии по данному вопросу продолжаются, и окончательно проблема не решена до настоящего времени. В связи с этим исследование влияния эвтектики на температурную и концентрационную зависимости поверхностного натяжения (**ПН**) растворов представляет научный и практический интерес.

Рассмотрим подробнее имеющиеся в научной литературе экспериментальные данные по температурной зависимости ПН эвтектических систем.

В середине прошлого века авторами [6] опубликованы результаты экспериментальных исследований ПН эвтектических систем, согласно которым изотермы ПН расплавов Sn – Pb и Pb – Bi в области эвтектики характеризовались аномалиями в виде минимумов. Авторами сделан вывод о влиянии эвтектической структуры на концентрационную зависимость ПН.

В дальнейшем ПН эвтектических систем Sn – Pb, Pb – Bi, Sn – Au были изучены авторами работы [7]. Измерения проводились в глубоком вакууме по гравитационной методике П. П. Пугачевича [8]. Экспериментальные исследования с использованием металлов высокой чистоты проводились в целях определения влияния эвтектики на ПН расплавов. Поэтому тщательно изучалась именно область эвтектики. На основе прецизионных измерений сделан вывод о том, что эвтектика не влияет на изотермы ПН. Данный вывод подтверждается экспериментальными результатами, полученными нами для двойных систем свинец – олово и индий – свинец, и целым рядом экспериментальных исследований, обзор которых дается в справочнике [9]. Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют об отсутствии корреляции между аномалиями на изотермах ПН с особенностями строения диаграмм состояния двойных систем. Можно привести множество примеров, когда двухкомпонентные системы со сложными диаграммами состояния характеризуются гладкими изотермами ПН и наоборот [10, 11]. Так, например, системы: олово – свинец, свинец – висмут, золото – олово, олово – таллий, индий – олово, висмут – индий, висмут – олово, галлий – олово, галлий – индий и т.д., характеризуются гладкими изотермами ПН, хотя и являются эвтектическими.

Таким образом, исходя из вышеизложенного, можно утверждать, что эвтектика не оказывает влияния на концентрационную зависимость ПН. По-видимому, на изотермы ПН оказывают влияние только те химические соединения, которые устойчиво сохраняются в жидком состоянии и которые можно рассматривать как отдельные компоненты с присущим им значением химического потенциала. Сказанное в полной мере относится и к двойным системам эвтектического типа.

Вместе с тем такой однозначности нет относительно влияния эвтектики на концентрационную зависимость температурного коэффициента поверхностного натяжения $d\sigma/dT$. В научной литературе, на основе полученных экспериментальных данных, высказывалась мысль о том, что в области эвтектики аномально ведут себя не изотермы ПН, а концентрационная зависимость температурного коэффициента ПН [7]. Поэтому представляет интерес подробно рассмотреть и проанализировать имеющиеся экспериментальные результаты по концентрационной зависимости температурного коэффициента ПН, с точки зрения поиска корреляций между аномалиями на изотермах $d\sigma/dT$ и особенностями диаграммы состояния двойной системы.

На аномальное поведение $d\sigma/dT$ при эвтектической концентрации в системе олово – свинец и висмут – свинец, на основе проведенных экспериментальных измерений, впервые указали авторы [7]. Было показано, что температурный коэффициент ПН с ростом содержания поверхностно активного компонента (свинца в данном случае) уменьшается по абсолютной величине, достигая макси-

мума в области эвтектики, а в системе свинец – висмут принимает в этой области даже положительное значение. Авторы указанной работы склонны считать, что эти аномалии могут быть обусловлены особенностями строения эвтектического сплава.

Однако полученных экспериментальных результатов недостаточно для обобщающих выводов относительно влияния эвтектики на температурный коэффициент ПН, а целенаправленные исследования влияния структуры эвтектического сплава на концентрационную зависимость $d\sigma/dT$ не проводились.

Цель работы – экспериментально исследовать концентрационную зависимость температурного коэффициента ПН в двойных эвтектических системах олово – свинец и индий – свинец.

Как подчеркнуто выше, впервые на особенности изменения температурного коэффициента поверхностного натяжения от состава в области эвтектики обратили внимание авторы работы [7], которые исследовали температурную зависимость ПН расплавов двойных систем свинец – висмут, свинец – олово, олово – золото. При этом экспериментаторами не уделялось должного внимания изучению концентрационной зависимости температурного коэффициента ПН. Обусловлено это, на наш взгляд тем, что точные измерения $d\sigma/dT$ – задача сложная и в некоторых случаях неразрешимая. Если при измерении ПН легкоплавких металлов и сплавов экспериментаторы сумели достигнуть точности 0,1 %, то измерения $d\sigma/dT$ проводят с погрешностью10 – 15 %. Очевидно, что, при близости значений $d\sigma/dT$ чистых металлов, этой точности недостаточно даже для установления качественной зависимости $d\sigma/dT$ от состава. Для повышения точности измерения $d\sigma/dT$ необходимо разработать новые более совершенные методы, позволяющие с достаточной точностью проводить измерения ПН в широкой области температур.

Таким образом, несмотря на важность и актуальность, изучению концентрационной зависимости $d\sigma/dT$ в двойных системах до настоящего времени не уделялось должное внимание. В связи с этим, нами, при исследовании ПН тройных расплавов индий – олово – свинец, подробно изучена температурная зависимость поверхностного натяжения боковых двойных эвтектических систем олово – свинец и индий – свинец. Исследования проводились в комбинированном приборе, где ПН измеряется по гравитационной методике П. П. Пугачевича, а плотность – усовершенствованным ареометром. Подробное описание прибора и методики проведения эксперимента дается в монографии [12]. Отметим, что в наших измерениях максимальная погрешность измерения ПН составляет 0,7 %, а температурного коэффициента ПН – 15 %. Такая точность измерения $d\sigma/dT$ позволяет установить его концентрационную зависимость в изученных двойных системах. Полученные экспериментальные данные, как по ПН, так и по температурной зависимости ПН расплавов олово – свинец и индий – свинец, в пределах погрешности эксперимента совпадают с данными [7, 13] (рис. 1).

Несмотря на трудности, обусловленные неточностью определения температурного коэффициента ПН, полученные результаты и имеющиеся экспериментальные данные позволяют сделать некоторые обобщающие выводы относительно концентрационной зависимости $d\sigma/dT$ в двойных системах. В частности, как видно из рис. 2, по мере увеличения содержания поверхностно активного компонента, (свинца в данном случае), $d\sigma/dT$ увеличивается по абсолютной величине, а для некоторых систем достигает даже положительных значений (свинец – висмут, галлий – олово, галлий – индий и т.д.). В интервале 20 – 40 атомных % поверхностно активного компонента $d\sigma/dT$ достигает своего максимального значения.

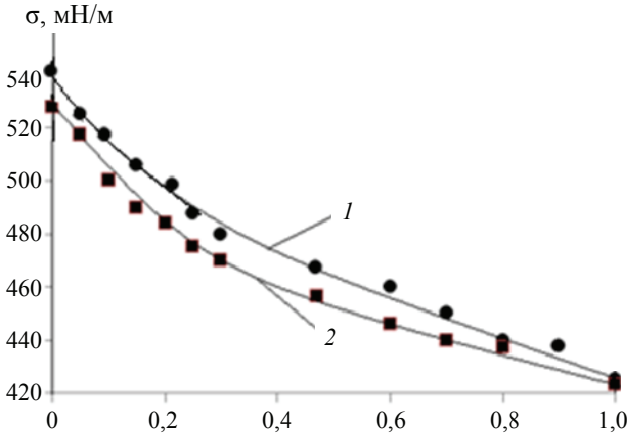


Рис. 1. Поверхностное натяжение σ расплавов при T = 773 К:
1 – In – Pb; *2* – Sn – Pb

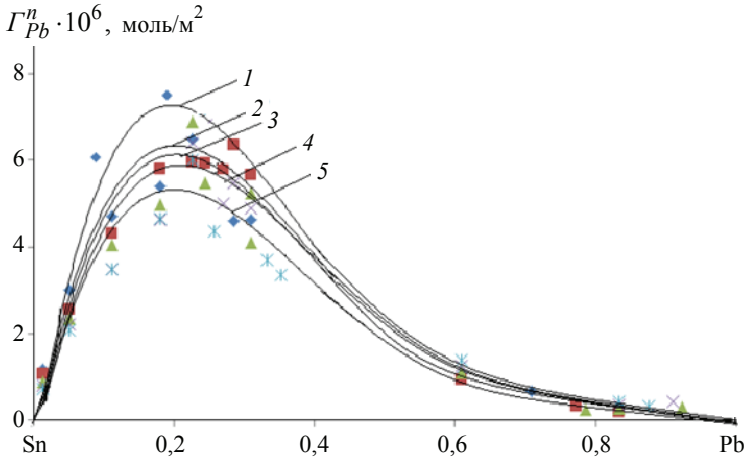


Рис. 2. Изотермы адсорбции свинца Γ^n_{Pb} в системе Sn – Pb при температуре, К:
1 – 573; *2* – 623; *3* – 673; *4* – 723; *5* – 773

Дальнейшее увеличение содержания поверхностно активного компонента приводит к монотонному спаду кривой $d\sigma/dT$ до значения температурного коэффициента ПН второго компонента. Выявленная закономерность свойственна всем двойным системам, рассмотренным в работе, что дает основание утверждать следующее: полученная зависимость $d\sigma/dT$ от состава свойственна всем двойным системам с гладкими изотермами ПН.

Для некоторых двойных систем состав эвтектического сплава находится в пределах 10 – 40 % поверхностно активного компонента, что, по-видимому, послужило поводом для выводов о том, что эти особенности обусловлены влиянием структуры эвтектики. Однако анализ имеющихся экспериментальных данных показывает, что данная закономерность наблюдается только в тех системах, эвтектика которых расположена вблизи инактивного компонента. В тех случаях, когда эвтектика расположена вблизи поверхностно активного компонента, данная закономерность нарушается (например, таллий – висмут [14], галлий – висмут [7], индий – олово [14] и т.д.). Это свидетельствует о том, что эвтектика не оказывает

влияния на изотермы коэффициента ПН. Следовательно, аномальное поведение температурного коэффициента ПН обусловлено не влиянием эвтектики, а другими причинами. Рассмотрим подробнее вопрос о факторах, оказывающих влияние на температурную зависимость ПН двойных расплавов.

В научной литературе установлено, что с ростом температуры на поверхностное натяжение расплавов действует два противоположных фактора [12]. С одной стороны, с увеличением температуры межатомные расстояния увеличиваются, а силы взаимодействия между атомами уменьшаются, что приводят к уменьшению значения ПН, с другой – увеличение температуры сопровождается десорбцией поверхностно активного компонента, что должно привести к росту значения ПН. Очевидно, что величина и знак $d\sigma/dT$ определяются соотношением этих факторов.

Следует отметить, что интенсивность десорбции должна зависеть, прежде всего, от величины адсорбции при начальных температурах. Чем выше значение адсорбции при начальных температурах, тем интенсивнее с увеличением температуры должен идти процесс десорбции поверхностно активного компонента [15]. Для проверки данной гипотезы проведены расчеты десорбции свинца в двойных системах индий – свинец и олово – свинец. Для определения величины десорбции свинца по концентрационной зависимости ПН проведены расчеты *N*-варианта адсорбции свинца по Гуггенгейму – Адаму в указанной двойной системе при разных температурах (см. рис. 2). По результатам несложно найти величину десорбции, обусловленную увеличением температуры в пределах 350…500 °С. Очевидно, что величина десорбции равна разности адсорбции при данных температурах (рис. 3). Из рисунка видно, что действительно, величина десорбции находится в прямой зависимости от значения адсорбции, и максимумы на изотермах адсорбции и десорбции наблюдаются при одной и той же концентрации второго компонента.

Для наглядности изображена концентрационная зависимость температурного коэффициента поверхностного натяжения $d\sigma/dT$, которая характеризуется максимумом при тех же концентрациях поверхностно активного компонента, что и изотермы адсорбции и десорбции (см. рис. 3). Отметим, что примерно в этой области находится и эвтектика. При приближении состава сплава к данному составу (25% свинца) температурный коэффициент уменьшается по абсолютной величине и при достижении этой концентрации достигает своего максимального значения.

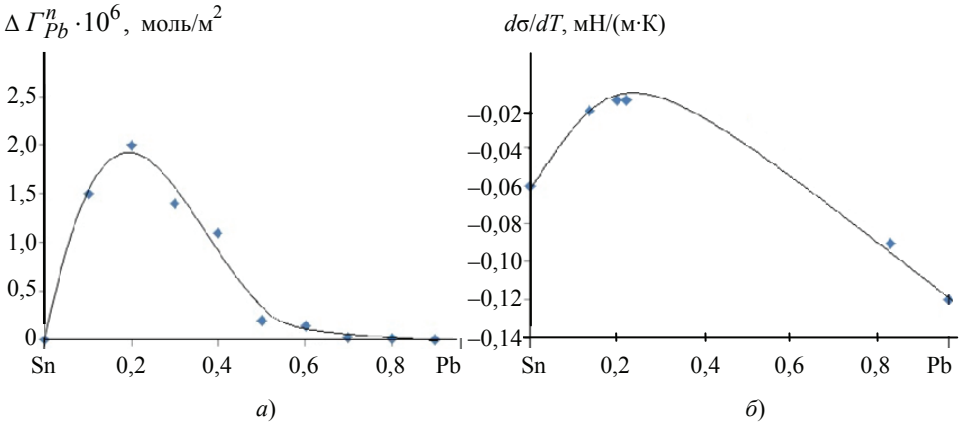


Рис. 3. Концентрационная зависимость десорбции свинца (*а*) и температурного коэффициента поверхностного натяжения (*б*) в системе Sn – Pb

Таким образом, в изученных системах концентрационная зависимость $d\sigma/dT$ практически повторяет изотермы адсорбции и десорбции поверхностно активного свинца. Максимумы на изотермах адсорбции, десорбции и на концентрационной зависимости коэффициента ПН практически совпадают. Зависимость $d\sigma/dT$ от десорбции, а, следовательно, и адсорбции, свинца практически передается линейной функцией. Выявленные закономерности подтверждаются и экспериментальными данными по другим двойным эвтектическим системам, свидетельствующие о том, что аномалии на изотермах концентрационной зависимости коэффициента ПН обусловлены не влиянием эвтектики, а связаны с процессами десорбции поверхностно активного компонента, которые вызваны увеличением температуры.

Список литературы

1. Таран, Ю. Н. Структура эвтектических сплавов : монография / Ю. Н. Таран, В. И. Мазур. – М. : Металлургия, 1978. – 312 с.
2. Скрышевский, А. Ф. Строение жидкого эвтектического сплава Bi – Pb по данным рентгеноструктурного анализа / А. Ф. Скрышевский // Доклады АН УССР. – 1956. – № 1. – С. 62 – 66.
3. Smallman, R. E. An X-Ray Investigation of the Structure of Liquid Mercury and Liquid Mercury-Thallium Alloys / R. E. Smallman, B. R. T. Frost // Acta Metallurgica. – 1956. – Vol. 4, Issue 6. – P. 611 – 618.
4. Дутчак, Я. И. Рентгенографическое исследование структуры некоторых металлических жидкостей / Я. И. Дутчак, А. Г. Мыколайчук, Н. М. Клым // Физика металлов и металловедение. – 1962. – Т. 14, № 4. – С. 548 – 554.
5. Расплавы как основа формирования структуры и свойств алюминиевых сплавов : монография / И. Г. Бродова, П. С. Попель, Н. М. Барбин, Н. А. Ватолин. – Екатеринбург : УрО РАН, 2005. – 369 с.
6. Клячко, Ю. А. О поверхностном натяжении эвтектических сплавов / Ю. А. Клячко, Л. Л. Кунин // Доклады АН СССР. – 1949. – Т. 64, № 1. – С. 85–86.
7. Исследование поверхностного натяжения систем олово – висмут и олово – свинец / Х. И. Ибрагимов, Н. Л. Покровский, П. П. Пугачевич, В. К. Семенченко // Поверхностные явления в расплавах и возникающих из них твердых фазах. – Нальчик : Кабардино–Балкарский гос. ун-т, 1965. – С. 269 – 276.
8. Пугачевич, П. П. Некоторые вопросы измерения поверхностного натяжения металлических расплавов методом максимального давления в газовом пузырьке / П. П. Пугачевич // Поверхностные явления в металлургических процессах. – М. : Металлургиздат,1963. – С. 177 – 192.
9. Ниженко, В. И. Поверхностное натяжение жидких металлов и сплавов (одно- и двухкомпонентные системы) : справочник / В. И. Ниженко, Л. И. Флока. – М. : Металлургия, 1981. – 208 с.
10. Concentration Dependence of the Surface Tension for Binary Systems / R. Kh. Dadashev, Kh. B. Khokonov, Dj. Z. Elimkhanov, Z. I. Bichueva // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2007. – Vol. 71, No. 2. – P. 257 – 259.
11. Dadashev, R. Kh. Analytical Description of Concentration Dependence of Surface Tension in Multicomponent Systems / R. Kh. Dadashev, R. A. Kutuev, Dj. Z. Elimkhanov // Journal of Physics: Conference Series. – 2008. – Vol. 98, No. 6. – P. 062029 (5). doi: 10.1088/1742-6596/98/6/062029
12. Дадашев, Р. Х. Термодинамика поверхностных явлений : монография / Р. Х. Дадашев ; под ред. Х. Б. Хоконова. – 2-е изд., испр. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 281 с.

13. Покровский, Н. Л. Исследование поверхностного натяжения системы индий – свинец /Н. Л. Покровский, П. П. Пугачевич, Н. П. Голубев // Доклады АН СССР. – 1968. – Т. 181, № 1. – С. 80 – 83.

14. Дадашев, Р. Х. Поверхностные свойства расплавов индий – олово и таллий – висмут / Р. Х. Дадашев, Х. И. Ибрагимов, С. М. Юшаев // Известия вузов. Цветная металлургия. – 1984. – № 1. – С. 121–122.

15. Surfacetens Ion of Indium – Tin – Gallium Melts / R. Kh. Dadashev, R. A. Kutuev, Dj. Z. Elimkhanov, Z. I. Bichueva // Russian Journal of Physical Chemistry A. – 2007. – Vol. 81, No. 11. – P. 1734 – 1737.

Temperature Dependence of Surface Tension of Eutectic Alloy

R. Kh. Dadashev[1,3], B. B. Alchagirov[2], D. Z. Elimkhanov[3], H. S. Talkhigova[1], Z. I. Dadasheva[1]

Department of Theoretical Physics (1), raykom50@mail.ru;
Chechen State University, Grozny, Chechen Republic;
Department of Condensed Matter Physics (2), Kabardino-Balkaria State University, Nalchik, Kabardino-Balkaria Republic;
Center for Materials Science (3), Academy of Sciences of the Chechen Republic, Grozny, Chechen Republic

Keywords: adsorption; desorption; metal melts; surface tension; surface tension of the eutectic alloy; temperature coefficient of surface tension; eutectic.

Abstract: The results of a study of the influence of eutectics on the concentration dependence of the temperature coefficient of surface tension (ST) are presented. A critical analysis of the available experimental data on the temperature dependence of the ST of eutectic systems is made. Experimental studies of the concentration and temperature dependences of STs of tin - lead and indium - lead melts have been carried out. Based on the obtained experimental data, adsorption calculations (N-variant according to the Guggenheim-Adam) of surface-active lead at different temperatures were made, which made it possible to determine the amount of lead desorption due to an increase in temperature. According to the data obtained, a functional dependence of the temperature coefficient of the ST on the desorption value of the surface-active component is established. Thus, anomalies in the form of a maximum were found in the concentration dependence of the temperature coefficient of the ST of binary tin – lead and indium – lead systems. It is shown that these features are caused by desorption of surface-active lead, which is caused by an increase in temperature.

References

1. Taran Yu.N., Mazur V.I. *Struktura evtekticheskikh splavov: monografiya* [The structure of eutectic alloys: monograph], Moscow: Metallurgiya, 1978, 312 p. (In Russ.)

2. Skryshevskiy A.F. [The structure of the liquid eutectic Bi-Pb alloy according to x-ray diffraction analysis], *Doklady AN USSR* [Doklady AN USSR], 1956, no. 1, pp. 62-66. (In Russ.)

3. Smallman R.E., Frost B.R.T. An X-Ray Investigation of the Structure of Liquid Mercury and Liquid Mercury-Thallium Alloys, *Acta Metallurgica*, 1956, vol. 4, issue 6, pp. 611-618.

4. Dutchak Ya.I., Mykolaychuk A.G., Klym N.M. [X-ray diffraction study of the structure of certain metallic fluids], *Fizika metallov i metallovedeniye* [Physics of metals and metal science], 1962, vol. 14, no. 4, pp. 548-554. (In Russ.)

5. Brodova I.G., Popel' P.S., Barbin N.M., Vatolin N.A. *Rasplavy kak osnova formirovaniya struktury i svoystv alyuminiyevykh splavov: monografiya* [Melts as the basis for the formation of the structure and properties of aluminum alloys: monograph], Yekaterinburg: UrO RAN, 2005, 369 p. (In Russ.)

6. Klyachko Yu.A., Kunin L.L. [On the surface tension of eutectic alloys], *Doklady AN SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences], 1949, vol. 64, no. 1, pp. 85-86. (In Russ.)

7. Ibragimov Kh.I., Pokrovskiy N.L., Pugachevich P.P., Semenchenko V.K. *Poverkhnostnyye yavleniya v rasplavakh i voznikayushchikh iz nikh tverdykh fazakh* [Surface phenomena in melts and solid phases arising from them], Nal'chik: Kabardino-Balkarskiy gosudarstvennyy universitet, 1965, pp. 269-276. (In Russ.)

8. Pugachevich P.P. *Poverkhnostnyye yavleniya v metallurgicheskikh protsessakh* [Surface phenomena in metallurgical processes], Moscow: Metallurgizdat, 1963, pp. 177-192. (In Russ.)

9. Nizhenko V.I., Floka L.I. *Poverkhnostnoye natyazheniye zhidkikh metallov i splavov (odno- i dvukhkomponentnyye sistemy): spravochnik* [Surface tension of liquid metals and alloys (one- and two-component systems): reference book], Moscow: Metallurgiya, 1981, 208 p. (In Russ.)

10. Dadashev R.Kh., Khokonov Kh.B., Elimkhanov Dj.Z., Bichueva Z.I. Concentration Dependence of the Surface Tension for Binary Systems, *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2007, vol. 71, no. 2, pp. 257-259.

11. Dadashev R.Kh., Kutuev R.A., Elimkhanov Dj.Z. Analytical Description of Concentration Dependence of Surface Tension in Multicomponent Systems, *Journal of Physics: Conference Series*, 2008, vol. 98, no. 6, pp. 062029 (5), doi: 10.1088/1742-6596/98/6/062029

12. Dadashev R.Kh., Khokonov Kh.B. [Ed.] *Termodinamika poverkhnostnykh yavleniy: monografiya* [Thermodynamics of surface phenomena: monograph], Moscow: FIZMATLIT, 2008, 281 p. (In Russ.)

13. Pokrovskiy N.L., Pugachevich P.P., Golubev N.P. [Investigation of the surface tension of the indium – lead system], *Doklady AN SSSR* [Doklady AN SSSR], 1968, vol. 181, no. 1, pp. 80-83. (In Russ.)

14. Dadashev R.Kh., Ibragimov Kh.I., Yushayev S.M. [The surface properties of indium – tin and thallium – bismuth melts], *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya* [University proceedings. Non-ferrous metallurgy], 1984, no. 1, pp. 121-122. (In Russ.)

15. Dadashev R.Kh., Kutuev R.A., Elimkhanov Dj.Z., Bichueva Z.I. Surfacetens Ion of Indium-Tin-Gallium Melts, *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2007, vol. 81, no. 11, pp. 1734-1737.

Temperaturabhängigkeit der Oberflächenspannung der eutektischen Legierung

Zusammenfassung: Es sind die Ergebnisse einer Studie zum Einfluss des Eutektikums auf die Konzentrationsabhängigkeit des Temperaturkoeffizienten der Oberflächenspannung (OS) vorgestellt. Eine kritische Analyse der verfügbaren experimentellen Daten zur Temperaturabhängigkeit der OS von eutektischen Systemen ist durchgeführt. Experimentelle Untersuchungen der Konzentrations- und Temperaturabhängigkeiten der OS von Zinn-Blei- und Indium-Blei-Schmelzen sind durchgeführt. Basierend auf den erhaltenen experimentellen Daten sind Adsorptionsberechnungen (*N*-Variante nach Guggenheim-Adam) von

oberflächenaktivem Blei bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt, was ermöglichte, das Ausmaß der Bleidesorption aufgrund eines Temperaturanstiegs zu bestimmen. Gemäß den erhaltenen Daten ist die funktionelle Abhängigkeit des Temperaturkoeffizienten der OS vom Desorptionswert der oberflächenaktiven Komponente festgestellt. So sind Anomalien in Form eines Maximums in der Konzentrationsabhängigkeit des Temperaturkoeffizienten der OS von binären Zinn-Blei- und Indium-Blei-Systemen gefunden worden. Es ist gezeigt, dass diese Merkmale durch Desorption von oberflächenaktivem Blei verursacht werden, die auf einen Temperaturanstieg zurückzuführen ist.

Dépendance de la température de la tension superficielle de l'alliage eutectique

Résumé: Sont présentés les résultats de l'étude de l'effet de l'eutectique sur la dépendance de la concentration du coefficient de température de la tension de surface (TS). Est effectuée une analyse critique des données expérimentales disponibles sur la dépendance de température de TS des systèmes eutectiques. Sont exécutées les études expérimentales des relations de concentration et de température de TS des masses fondues étain – plomb et indium – plomb. A la base des données expérimentales obtenues, sont executés des calculs d'adsorption (variante n de Gugguenheim-Adam) du plomb tensioactif à différentes températures ce qui a permis de déterminer l'ampleur de la désorption du plomb due à l'augmentation de la température. D'après les données obtenues est établie une dépendance fonctionnelle du coefficient de température de TS sur la valeur de la désorbitation du composant tensioactif. Ainsi, des anomalies maximales ont été détectées en fonction de la concentration du coefficient de température de TS des systèmes jumeaux étain-plomb et indium – plomb. Est démontré que ces valeurs sont dues à la désorption du plomb tensioactif provoquée par une augmentation de la température.

Авторы: ***Дадашев Райком Хасимханович*** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Теоретическая физика», ФГБОУ ВО «Чеченский государственный университет», г. Грозный, Чеченская Республика; ***Алчагиров Борис Батокович*** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Физика конденсированного состояния», ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет», г. Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика; ***Элимханов Джабраил Зайндиевич*** – кандидат физико-математических наук, заместитель директора Центра проблем материаловедения, ГКНУ «Академия наук Чеченской Республики»; ***Талхигова Халимат Салавдиевна*** – кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Теоретическая физика»; ***Дадашева Зарема Имрановна*** – кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Теоретическая физика», ФГБОУ ВО «Чеченский государственный университет», г. Грозный, Чеченская Республика.

Рецензент: ***Керимов Ибрагим Ахмедович*** – доктор физико-математических наук, профессор, академик, ГКНУ «Академия наук Чеченской Республики», г. Грозный, Чеченская Республика.

УДК 624.011.2
DOI: 10.17277/vestnik.2020.01.pp.133-139

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УТЕПЛИТЕЛЯ AUSTROTHERM С ОТДЕЛКОЙ ИЗ ЦЕМЕНТНО-ШЛАКОВОГО РАСТВОРА

В. П. Ярцев, В. А. Кузнецов

Кафедра «Конструкции зданий и сооружений»,
Kuznetsov_Vladislav_Andreevich@mail.ru ;
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия

Ключевые слова: сопротивление теплопередаче; тепловая защита; тепловые потери; термическое сопротивление; утеплитель; цементно-шлаковый раствор.

Аннотация: Выбраны основные материалы для дополнительного утепления и наружной отделки стеновой панели здания. Все элементы модернизации соответствуют требованиям энергоэффективности и экологичности. Выполнен расчет теплопотерь каркасно-панельного дома с дополнительным утеплением Austrotherm и отделкой из цементно-шлакового раствора и проведено сравнение по теплотехническим показателям в северном и южном регионах России.

Каркасно-панельный дом состоит из плит цокольного перекрытия, на которые опирается антисептированный опорный брус, среднеразмерных стеновых панелей, плит междуэтажного перекрытия, собранных на производстве АО «ТАМАК», антресоли и элементов крыши.

Панель (цокольная, междуэтажная, стеновая) представляет собой деревянный каркас, выполненный из хвойных пород дерева, негорючего утеплителя из минераловатных плит Isoroc (Изолайт или Isover) различной толщины и плотности, и обшивки из цементно–стружечных плит (**ЦСП**). Данные панели весьма просты в монтаже, легкие, прочные, теплые и экологически чистые [1].

Каркас изготавливается из сосны, поставляемой с Урала и Сибири. Пиломатериал проходит строгий входящий контроль, автоматическую калибровку, сортировку и промышленную сушку. В готовых конструкциях сухой пиломатериал не подвергается гниению[2].

В стеновых панелях применяется утеплитель из негорючей базальтовой минераловатной плиты Изолайт, он обладает необходимой плотностью (60 кг/м^3) и жесткостью, исключающие его осаживание. Для северных регионов общая толщина утепления наружных стен составляет не менее 200 мм. ISOROC относится к классу материалов повышенной биостойкости. Материал не подвержен воздействию насекомых и гниению [3].

Обшивка из ЦСП идеально подходит для стеновых панелей с деревянным каркасом. Цементно-стружечные плиты имеют преимущества перед рядом других листовых строительных материалов: ориентировано-стружечная плита (**ОСП**), стекломагниевый лист (**СМЛ**), древесно-стружечная плита (**ДПС**) и т.д. Материал

весьма плотный (1100…1400 кг/м^3), с удельной теплоемкостью 1,15 кДж/(кг·°С), дышащий паропроницаемый материал (0,03 мг/(м·ч·Па). Данный элемент имеет IV степень огнестойкости. Индекс распространения пламени – нулевой (пламя по поверхности не распространяется), предел огнестойкости – 50 мин, группа дымообразующей способности – Д (токсичные газы и пары не выделяются). Устойчив к гниению, с хорошей звукоизоляцией, водоустойчив, гарантийный срок службы 50 лет [4, 5].

Утеплитель из пенополистирола Austrotherm (Польша) толщиной 160 мм, с параметрами: EPS-EN 13163-L3-A2-T1-S2-P3-DS (N) 2-DS (70,-) 1-TR150-BS100, Lambda 0.031 W/mK. Утеплитель крепится к панели при помощи органического клея фирмы STO.

Цементно-шлаковый раствор, толщиной 7 мм. Это вяжущий гидравлический компонент, производимый посредством измельчения цементного клинкера, шлака в гранулах (20 – 80 %, но оптимально 50 %) и гипса (максимум 5 %). Обладает коррозийной стойкостью на высоком уровне, повышенным показателем морозостойкости, сравнительно низкой температурой тепловыделения.

Сравнительные расчеты теплопотерь наружных стеновых панелей в городах Агата и Сочи проводились в программе SmartCalc. Для расчета приняты следующие данные: стандартная стеновая панель «ТАМАК» (ЦСП толщиной 12 мм, пароизоляционная мембрана толщиной 0,1 мм, утеплитель из минеральной каменной ваты плотностью 45…75 кг/м^3, толщиной 150 мм, ЦСП толщиной 12 мм), Austrotherm γ = 125 кг/м^3 – 160 мм, цементно-шлаковый раствор 1400 кг/м^3 – 7 мм. Слои конструкции (внутри–снаружи) представлены на рис. 1.

Тепловая защита для городов Сочи и Агата представлена в табл. 1 [6].

Результаты расчета стандартной стеновой панели «ТАМАК» с дополнительным утеплением Austrotherm и отделкой из цементно-шлакового раствора для городов Сочи и Агата приведены в табл. 2 (слои – см. рис. 1).

Термические сопротивления для городов Сочи и Агата, (м^2·°С)/Вт, соответственно: $R_а$ – 5,66 и 6,17; $R_б$ – 5,08 и 5,62; ограждающей конструкции – 5,27 и 5,80. Сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции R соответственно – 5,43 и 5,96.

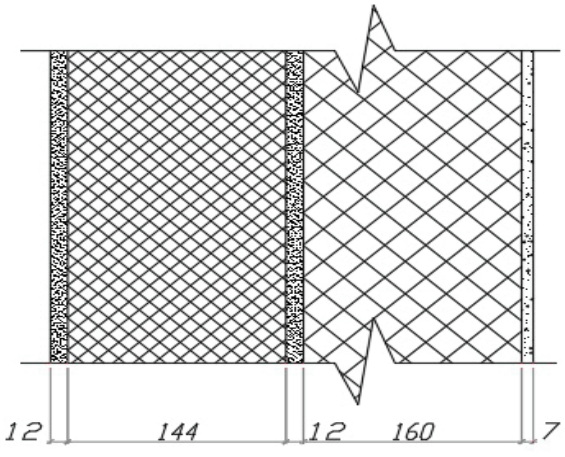


Рис. 1. Слои конструкции (внутри–снаружи):
1 – ЦСП (внутри) – 12 мм; *2* – пароизоляционная мембрана – 0,2 мм;
3 – минеральная (каменная) вата 45…75 кг/м^3 – 144 мм; *4* – ЦСП (снаружи) – 12 мм;
5 – Austrotherm γ=125кг/м^3 – 160 мм; *6* – цементно-шлаковый раствор 1400 кг/м3 – 7 мм

Таблица 1

Тепловая защита для городов Сочи и Агата

Показатель	Сочи	Агата
Температура холодной пятидневки с обеспеченностью 0,92, °С	–2	–53
Продолжительность отопительного периода, сут.	94	292
Средняя температура воздуха отопительного периода, °С	6,6	–16,6
Условия эксплуатации помещения	Б	А
Число градусо-суток отопительного периода (**ГСОП**), °С·сут.	1260	10979
Санитарно-гигиенические требования $R_с$, (м^2·°С)/Вт	0,63	2,13
Нормируемое значение поэлементных требований $R_э$, (м^2·°С)/Вт	1,16	3,30
Базовое значение поэлементных требований $R_т$, (м^2·°С)/Вт	1,84	5,24

Таблица 2

Результаты расчета тепловой защиты для городов Сочи и Агата

Материал	λ, Вт/(м^2·°С)	R, (м^2·°С)/Вт	T_{max}, °С	T_{min}, °С
ЦСП (внутри)	0,26 / 0,23	0,05	19,50	19,30
Пароизоляционная мембрана	0	0,00	19,30	19,30
Минеральная вата 44…75 кг/м^3	0,043 / 0,038	3,35 / 3,79	19,30	4,30 / 3,70
Каркас из сосны и ели с шагом 600 мм, сечением 144×70 мм	0,18 / 0,14	0,80/1,90 / 1,03/2,30	–	–
ЦСП (снаружи)	0,26 / 0,23	0,05	4,30 / 3,70	4,00 / 3,40
Austrotherm γ = 125 кг/м^3	0,06 / 0,05	3,08 / 3,20	4,00 / 3,40	–9,80
Цементно-шлаковый раствор 1400 кг/м^3	0,64 / 0,52	0,01	–9,80	–9,80

П р и м е ч а н и е . В числителе – данные для г. Сочи, в знаменателе – г. Агата; показатели сопротивления теплопередачи каркаса стеновой панели для городов Сочи и Агата соответственно 1,90 и 2,30.

Как видно из результатов расчета, стеновая панель «ТАМАК» с дополнительным наружным утеплением Austrotherm и отделкой из цементно-шлакового раствора в обоих случаях удовлетворяет требованиям теплозащиты согласно ГОСТ 26254–84 «Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций» [7].

Защита стеновой панели с дополнительным утеплением Austrotherm и отделкой из цементно-шлакового раствора

Расчет координаты плоскости максимального возможного увлажнения для городов Сочи «*А*» и Агата «*Б*» представлен на рис. 2.

Послойный расчет защиты от переувлажнения в городах Сочи и Агата представлен в табл. 3.

По графику и результатам расчета видно, что во всех вариантах в ограждающей конструкции переувлажнение невозможно. Конструкция полностью удовлетворяет требованиям от переувлажнения.

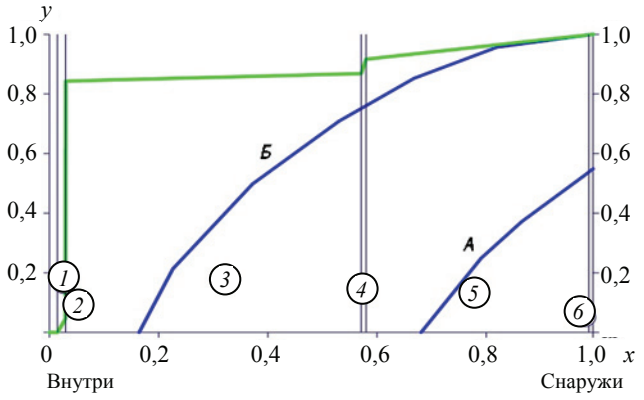


Рис. 2. Координата плоскости максимального возможного увлажнения для городов Сочи «*А*» и Агата «*Б*» (слои *1 – 6*, см. рис. 1)

Таблица 3

Послойный расчет защиты от переувлажнения для городов Сочи и Агата

Материал	μ	$R_{п.в}$, (м^2·°С)/Вт	$R_{п.тр1}$, (м^2·°С)/Вт	$R_{п.н}$, (м^2·°С)/Вт	$R_{п..тр2}$, (м^2·°С)/Вт
ЦСП (внутри)	0,03	0,00	0,00	0,40	0,00
Пароизоляционная мембрана	NaN	0,00	0,00	7,00	0,00
Минеральная вата 44…75 кг/м^3	0,62	7,63	1,17 0,66	0,23	0,00 2,23
ЦСП (снаружи)	0,03	0,00	0,00	0,40	0,00
Austrotherm γ = 125 кг/м^3	0,23	8,73 8,56	0,06 0,88	0,70	0,00 185,28
Цементно-шлаковый раствор 1400 кг/м^3	0,11	0,00	0,00	0,06	0,00

П р и м е ч а н и е . В числителе – данные для г. Сочи, в знаменателе – г. Агата; $R_{п.тр1}$, $R_{п.тр2}$ – показатели требуемого сопротивления теплопередаче стеновой внутри и снаружи соответственно.

Тепловые потери ограждающей конструкции для городов Сочи и Агата

Рассчитанные тепловые потери ограждающей конструкции для городов Сочи «*А*» и Агата «*Б*» представлены на рис. 3.

Потери тепла в час Q в зависимости от изменения сопротивления теплопередаче в городах Москва и Сочи представлены в табл. 4.

Из полученных результатов следует, что потери тепла за отопительный сезон для данной конструкции в городах Сочи и Агата составляют соответственно 5,57 и 43,02 кВт·ч.

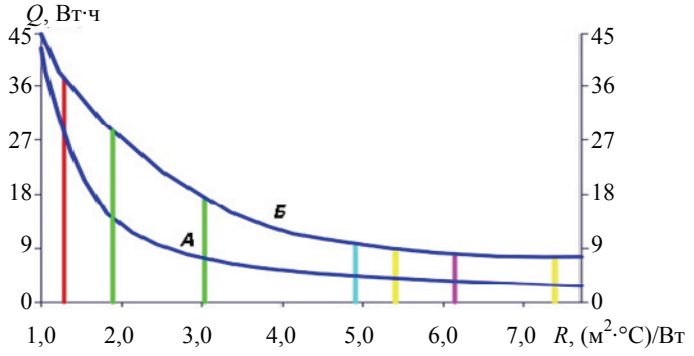


Рис. 3. Тепловые потери ограждающей конструкции для г. Сочи «*А*» и Агата «*Б*»

Таблица 4

Потери тепла в час при изменении сопротивления теплопередаче для городов Сочи и Агата

Сопротивление теплопередаче	R, (м^2·°С)/Вт	±R, %	Q, Вт·ч	±Q, Вт·ч
Санитарно-гигиенические требования $R_с$	0,63 2,13	–88,36 –64,34	34,80 34,33	30,75 22,09
Нормируемое значение поэлементных требований $R_э$	1,16 3,30	–78,64 –44,61	18,97 22,10	14,92 9,86
Базовое значение поэлементных требований $R_т$	1,84 5,24	–66,10 –12,07	11,95 13,92	7,90 1,68
Сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции R	5,43 5,96	0,00	4,05 12,24	0,00
R + 10 %	5,97 6,56	10,00	3,68 11,13	–0,37 –1,11
R + 25 %	6,79 7,45	25,00	3,24 9,79	–0,81 –2,45
R + 50 %	8,15 8,94	50,00	2,70 8,16	–1,35 –4,08
R + 100 %	10,86 11,92	100,00	2,03 6,12	–2,03 –6,12

Примечание. В числителе – данные для г. Сочи, в знаменателе – г. Агата.

Список литературы

1. Молчанова, Я. П. Современные требования к продукции, используемой в строительстве: стандарт в области окружающей среды и устойчивого развития / Я. П. Молчанова, М. А. Вартанян, Е. М. Аверочкин // Сб. материалов XI Всероссийской науч.-практ. конф. «Управление качеством», 12–13 марта 2012 г., Москва. – М., 2012. – С. 180–181.
2. ГОСТ 11047–90 Детали и изделия деревянные для малоэтажных жилых и общественных зданий. Технические условия. – Взамен ГОСТ 11047–72, ГОСТ 4.232–84. – Введ. 1991-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 12 с.
3. Литвинова, А. Экологичные материалы для строительства. – Текст : электронный / А. Литвинова // Nature Time. – URL : https://nature-time.ru/2013/12/ekologichnyie-materialyi-v-stroitelstve/ (дата обращения: 17.12.2019).
4. ГОСТ 26816–86 Плиты цементно-стружечные. Технические условия. – Введ.- 1986-07-01. – М. : Изд-во стандартов, 1986. – 20 с.
5. Ярцев, В. П. Прочность и долговечность цементно-стружечных плит / В. П. Ярцев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2000. – Т. 6, № 1. – С. 137 – 147.
6. Свод правил СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий // Минрегион России. – Введ. 2013-07-01. – М. : ООО «Аналитик», 2012. – 95 с.
7. ГОСТ 26254–84 Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций. – Введ. 1985-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1984. – 27 с.

Effect of Climate on Thermophysical Properties of Austrotherm Insulation with a Cement Slag Finish

V. P. Yartsev, V. A. Kuznetsov

Department of Construction of Buildings and Structures,
Kuznetsov_Vladislav_Andreevich@mail.ru; TSTU, Tambov, Russia

Keywords: heat transfer resistance; thermal protection; heat loss; thermal resistance; insulation; cement slag solution.

Abstract: The basic materials for additional insulation and exterior decoration of the wall panel of the building were selected. All materials meet the requirements of energy efficiency and environmental friendliness. Calculation of the heat loss of the frame-panel house with additional Austrotherm insulation and finishing from cement-slag mortar, and a comparison of the thermal performance in the northern and southern regions of Russia are made.

References

1. Molchanova Ya.P., Vartanyan M.A., Averochkin Ye.M. *Sbornik materialov XI Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Upravleniye kachestvom»* [Collection of materials of the XI All-Russian Scientific - practical conference "Quality Management"], 12-13 March, 2012, Moscow, 2012, pp. 180-181. (In Russ.)
2. GOST 11047–90 *Detali i izdeliya derevyannyye dlya maloetazhnykh zhilykh i obshchestvennykh zdaniy. Tekhnicheskiye usloviya* [GOST 11047–90 Details and wooden products for low-rise residential and public buildings. Technical conditions], Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1990, 12 p. (In Russ.)

3. https://nature-time.ru/2013/12/ekologichnyie-materialyi-v-stroitelstve/ (accessed 17 December 2019).

4. *GOST 26816–86 Plity tsementno-struzhechnyye. Tekhnicheskiye usloviya* [GOST 26816–86 Cement bonded particleboards. Technical conditions], Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1986, 20 p. (In Russ.)

5. Yartsev V.P. [Strength and durability of cement-bonded particle boards], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2000, vol. 6, no. 1, pp. 137-147. (In Russ., abstract in Eng.)

6. *Svod pravil SP 50.13330.2012 Teplovaya zashchita zdaniy* [Code of rules SP 50.13330.2012 Thermal protection of buildings], Moscow: OOO «Analitik», 2012, 95 p. (In Russ.)

7. *GOST 26254–84 Zdaniya i sooruzheniya. Metody opredeleniya soprotivleniya teploperedache ograzhdayushchikh konstruktsiy* [GOST 26254–84 Buildings and structures. Methods for determining the heat transfer resistance of building envelopes], Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1984, 27 p. (In Russ.)

Einfluss der klimatischen Einflüsse auf die thermophysikalischen Eigenschaften der Austrotherm-Dämmung mit Zementschlackenmörtel

Zusammenfassung: Es sind die Grundmaterialien für die zusätzliche Dämmung und Außendekoration der Wandplatte des Gebäudes ausgewählt. Alle Elemente der Modernisierung entsprechen den Anforderungen an Energieeffizienz und Umweltfreundlichkeit. Es ist die Berechnung des Wärmeverlustes des Rahmenplattenhauses mit zusätzlicher Austrotherm-Isolierung und Veredelung aus Zementschlackenmörtel erfüllt und der Vergleich der Wärmeleistung in den nördlichen und südlichen Regionen Russlands ist durchgeführt.

Influence de l'action climatique sur les propriétés thermiques et physiques de l'isolant Austrotherm avec une finition en mortier de ciment et de laitier

Résumé: Sont sélectionnés les matériaux de base pour l'isolation supplémentaire et la décoration extérieure du panneau mural du bâtiment. Tous les éléments de la modernisation répondent aux exigences de l'efficacité énergétique et au respect de l'environnement. Est réalisé le calcul des pertes de chaleur de la maison à ossature préfabriquée avec une isolation supplémentaire Austrotherm et une finition de mortier de ciment et de scories. Est effectuée une comparaison des indicateurs thermiques dans les régions du Nord et du Sud de la Russie.

Авторы: ***Ярцев Виктор Петрович*** – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструкции зданий и сооружений»; ***Кузнецов Владислав Андреевич*** – аспирант кафедры «Конструкции зданий и сооружений», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: ***Монастырев Павел Владиславович*** – доктор технических наук, профессор, директор института архитектуры, строительства и транспорта, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

УДК 691
DOI: 10.17277/vestnik.2020.01.pp.140-149

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БИТУМА МАРКИ БН 90/10 ПУТЕМ ЕГО НАПОЛНЕНИЯ СТЕКЛЯННЫМ ПОРОШКОМ

А. В. Ерофеев, В. А. Михайлов

Кафедра «Конструкции зданий и сооружений», AV.Erofeev@yandex.ru;
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия

Ключевые слова: битум марки БН 90/10; наполнение битумов; пенетрация битума; растяжимость; температура размягчения; ультрафиолетовое облучение.

Аннотация: Нефтяной битум марки БН 90/10 в настоящее время нашел широкое применение в строительстве в качестве гидроизоляционного материала. Однако со временем происходит резкое его старение и ухудшение характеристик. Исследовано ухудшение эксплуатационных характеристик битума марки БН 90/10 под действие ультрафиолетового облучения. Предложено замедлить процесс старения путем повышения величин исходных характеристик. Показано, что такой эффект может быть достигнут посредством наполнения битума стеклянным порошком. Для установления оптимального наполнения проведено математическое планирование эксперимента с последующей экспериментальной проверкой полученных результатов. В качестве наполнителя использовался стеклянный порошок двух фракций: 0,15 и 0,063. Исходя из проверки значимости коэффициентов полученного уравнения регрессии установлено, что добавление в битум стеклянного порошка фракции 0,15 является не целесообразным. Оптимальным соотношением стекла к битуму является 1:1,75 по объему V с фракцией стеклянного порошка 0,063, что и показал дальнейший эксперимент.

Введение

Битумы представляет смесь углеводородов и их азотистых, кислородистых, сернистых и металлосодержащих производных. Нефтяные битумы являются продуктом переработки нефти и ее смолистых остатков. В зависимости от вязкости их делят на жидкие, полутвердые и твердые; способа переработки – на остаточные, окисленные, крекинговые.

В настоящее время наиболее широкое распространение в строительстве получил нефтяной битум марки БН 90/10. Объемы его использования с каждым годом растут. При этом отмечено, что основным недостатком битумов является его нестойкость к условиям эксплуатации. Основные характеристики битумов, такие как температура размягчения, растяжимость и пенетрация, под действием условий эксплуатации резко снижаются, что приводит к невозможности дальнейшей нормальной эксплуатации материала. Таким образом, под действием эксплуатационных условий наблюдается так называемое старение битумов, обуславливающееся изменением его состава: масла переходят в смолы, смолы в асфальтены. Наблюдается увеличение количества асфальтенов в битуме. Постепенно происходит уменьшение количества смол, придающих битуму тягучесть, пластичность. По мере увеличения количества асфальтенов постепенно увеличивается хруп-

кость битума и ухудшаются его пластические свойства. Ухудшение эксплуатационных характеристик битумов под действием различных факторов установлено многими исследователями [1, 2]. В работе продемонстрировано ухудшение эксплуатационных характеристик битума марки БН 90/10 под действием ультрафиолетового облучения.

Таким образом, на основании вышеизложенного, одной из актуальных задач строительного материаловедения является замедление процесса старения битума под действием неблагоприятных факторов. Улучшение исходных характеристик битума путем его наполнения является решением данной проблемы [3, 4]. В качестве наполнителя предложено выбрать стеклянный порошок фракций 0,15 и 0,063. Для определения оптимального соотношения компонентов необходимо провести математическое планирование эксперимента. Эффективность наполнения следует оценивать на основании сравнения изменения температуры размягчения, растяжимости и пенетрации наполненного и не наполненного битума марки БН 90/10, подверженных ультрафиолетовому облучению [5].

Методология

При решении вопроса по установлению оптимального состава наполненного битума марки БН 90/10 целесообразным является оперирование не непосредственно с количеством (весовыми пропорциями и др.) ингредиентов, а с их отношениями [6]. В данном случае удобно использовать число отношений z_i, которое выражает зависимость между различными компонентами q-компонентной смеси, на единицу меньше числа исследуемых переменных, то есть для трехкомпонентной смеси

$$z_1 = \frac{x_1}{x_2}, \;\; z_2 = \frac{x_3}{x_2}.$$

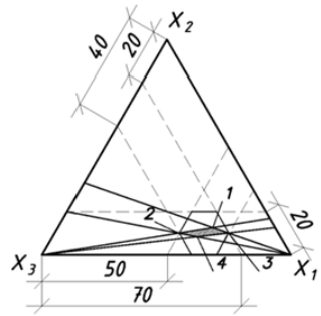
За переменные x_1, x_2, x_3 принимались соответственно связующее (битум марки БН 90/10), стеклянный порошок фракции 0,063 (мелкий заполнитель), стеклянный порошок фракции 0,15 (крупный заполнитель). В качестве отклика принята температура размягчения битума марки БН 90/10. Математическая модель для определения температуры размягчения битума описывается уравнением

$$\hat{y} = b_0 + b_1 \frac{x_1}{x_2} + b_2 \frac{x_3}{x_2},$$

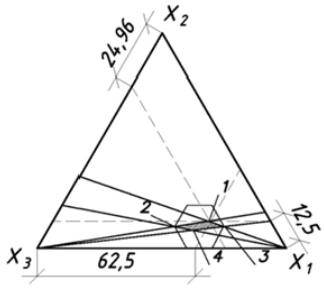
где b_0, b_1, b_2 – коэффициенты уравнения регрессии.

В результате предварительных экспериментов за исходную точку исследования композиционного материала принята точка с координатами $x_1^0 = 60$ %, $x_2^0 = 30$ %, $x_3^0 = 10$ %. Исходя из технико-экономических соображений, целесообразным считалось варьирование всех факторов около исходного уровня на ± 5 %. Экспериментальная область, следовательно, ограничивалась условиями $50 \le x_1 \le 70$, $20 \le x_2 \le 40$, $20 \le x_3 \le 0$.

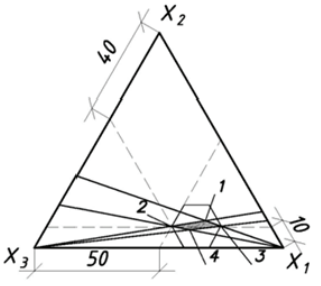
Множество точек, одновременно удовлетворяющих всем трем двусторонним ограничениям при данном ограничении экспериментальной области, образуют шестиугольник, показанный на рис. 1, *а*. Здесь все точки на какой-нибудь линии, исходящей из вершины x_3, имеют одно и то же соотношение компонентов x_1 и x_2. Аналогично, линия, исходящая из вершины x_1, является линией равных соотношений x_3 и x_2. Точки, в которых данные линии скрещиваются внутри допустимой области экспериментирования, могут быть точками плана. Пересчет комбинаций условий, выраженных в соотношениях z, в комбинации условий в соответствующих натуральных переменных x, приведено на рис. 1, *б – д*.



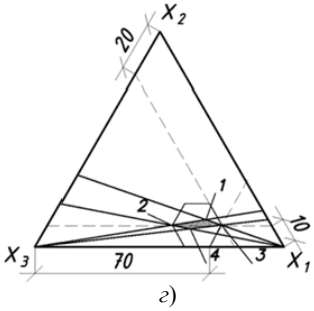
а)



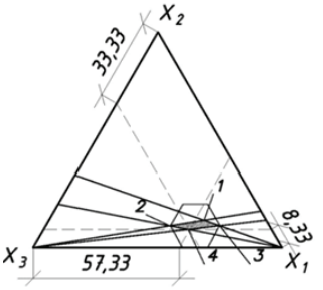
б)



в)



г)



д)

Рис. 1. Планирование эксперимента:
а – ограничение экспериментальной области; *б, в, г, д* – нижний уровень соотношения компонентов в точках *1*, *2*, *3* и *4* соответственно

Координаты точек, соответствующие опытам в исходных переменных x, определяются по следующим системам уравнений:

– для первого (см. рис. 1, *б*):

$$z_1^1 = \frac{x_1}{x_2} = 5, \quad z_2^1 = \frac{x_3}{x_2} = 2\,, \quad x_1 + x_2 + x_3 = 100$$

и равны соответственно 62,5, 12,5 и 25 %;

– второго (см. рис. 1, *в*):

$$z_1^1 = \frac{x_1}{x_2} = 1{,}4, \quad z_2^1 = \frac{x_3}{x_2} = 1{,}6, \quad x_1 + x_2 + x_3 = 100$$

и равны соответственно 50, 10 и 40 %;

– третьего (см. рис. 1, *г*):

$$z_1^1 = \frac{x_1}{x_2} = 5; \quad z_2^1 = \frac{x_3}{x_2} = 4, \quad x_1 + x_2 + x_3 = 100$$

и равны соответственно 70, 10 и 20 %;

– четвертого (см. рис. 1, *д*):

$$z_1^1 = \frac{x_1}{x_2} = 2{,}6, \quad z_2^1 = \frac{x_3}{x_2} = 1{,}6, \quad x_1 + x_2 + x_3 = 100$$

и равны соответственно 58,33, 8,4 и 33,33 %.

Реализация опытов, согласно комбинациям условий, приведенным в табл. 1, позволила определить отклики y, приведенные в последнем столбце таблицы. Так как изменение отклика y носит случайный характер, то в каждой точке $\bar{x}_g$ приходится проводить m параллельных опытов и результаты наблюдений y_{g1}, y_{g2}, ..., y_{gm} усреднять. Для каждой точки делали три замеса и результаты опытов усредняли.

Расчет коэффициентов уравнения регрессии, проведенный по стандартной методике, позволил получить уравнение регрессии, которое в данном случае имеет вид

$$\hat{y} = 78{,}93 - 0{,}104\frac{x_1}{x_2} + 0{,}663\frac{x_3}{x_2}.$$

Адекватность полученной модели проверялась на основании критерия Фишера. Вычисленное по результатам наблюдений значение критерия Фишера $F = 4{,}17$. Критическое значение $F_{кр} = 246$. Эмпирическое значение критерия F меньше критического $F_{кр}$, следовательно, гипотеза об адекватности не отвергается, и полученное математическое описание является адекватным. Проверка значимости коэффициентов уравнении регрессии позволила установить, что коэффициент b_1 является не значимым. Под данным коэффициентом понимается крупный заполнитель (стеклянный порошок фракции 0,15). Таким образом, оптимальным соотношением стеклянного порошка к битуму является 1:1,75 по объему V с фракцией порошка 0,063.

Для подтверждения полученных результатов, а также доказательства эффективности наполнения битума марки БН 90/10 стеклянным порошком в установленном соотношении проводились стандартные испытания.

Температура размягчения битума определялась на стандартном приборе кольцо-шар по ГОСТ 11506–73 [7]. Глубина проникновения иглы в битум (индекс пенетрации) определялся с помощью пенетрометра по ГОСТ 11501–78 [8]. Растяжимость битума определялась с помощью дуктилометра по ГОСТ 11505–75 [9].

Материал подвергался в течение 25, 50, 75, 100 и 125 часов ультрафиолетовому облучению в специальной камере.

Таблица 1

Матрица планирования

Номер опыта	План							Отклик y (температура размягчения)					
	в кодированных переменных		в отношениях		в исходных переменных, %								
	δ_1	δ_2	z_1	z_2	x_1	x_2	x_3	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	$\bar{y}$
1	–1	–1	5	2	62,5	12,5	25	76,0	76,5	75	76,0	75,5	75,88
2		+1		4	50,0	10,0	40	80,5	82,0	81	82,0	81,5	81,38
3	+1	–1	7	2	70,0		20	77,0	78,0	76	77,5	76,8	77,13
4		+1		4	58,33	8,4	33,33	80,7	82,0	81	81,8	81,5	81,38

Основная часть

Для проверки корректности проведенного математического планирования помимо полученных в ходе него соотношений использовали соотношения 1:3, 1:2 и 1:1 по *V*. Результаты определения основных эксплуатационных характеристик битума марки БН 90/10 в зависимости от наполнения наглядно представлены на рис. 2.

Исходя из данных по температуре размягчения, можно сделать вывод, что соотношение 1:2 является лучшим, так как температура размягчения выше, чем у других, и равна 75 °С (см. рис. 2, *а*). Практически аналогичный результат дало и математическое планирование эксперимента, что говорит об адекватности его проведения.

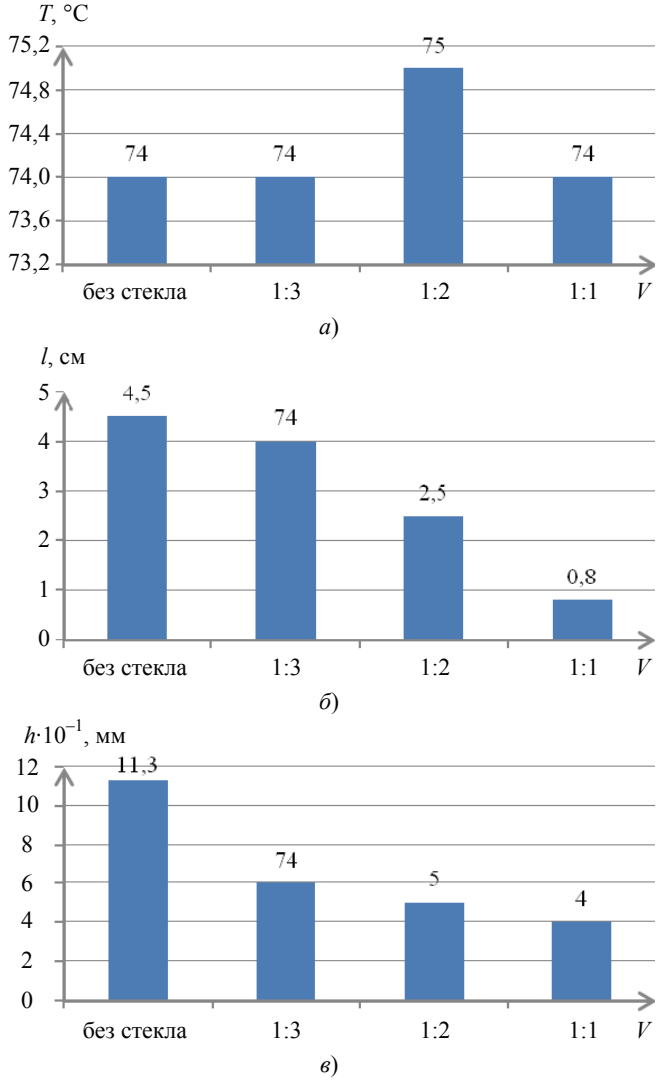


Рис. 2. Значения характеристик битума марки БН 90/10 с добавлением стекла с фракцией 0,063 в соотношениях 1:3, 1:2 и 1:1 по *V*:
а – температура размягчения, *T* °С; *б* – растяжимости, *l*, см, при *T* = 25 °С;
в – глубина проникновения иглы, *h*, мм

Исходя из данных по растяжимости, можно сделать вывод, что соотношение 1:3 является лучшим, так как растяжимость выше, чем у других, и равняется 4 см (см. рис. 2, *б*). Стоит отметить, что данный показатель хуже, чем для не наполненного битума. Однако такой эффект вполне ожидаем и объясним (в битум вводится плохо растяжимый материал). Следовательно, эту характеристику нельзя принимать за определяющую.

Исходя из данных по глубине проникновения иглы, можно сделать вывод, что соотношение 1:1 является лучшим, так как глубина проникновения иглы меньше, чем у других, и равна 0,4 мм (см. рис. 2, *в*). Однако все показатели входят в нормируемый интервал по ГОСТ, а с учетом большого разброса полученных экспериментальных данных ее также нельзя принимать за определяющую.

На рисунке 3, *а*, представлены графики, сравнивающие влияние УФ-облучения на битум, наполненный стеклянным порошком в соотношении 1:2 по *V* фракцией

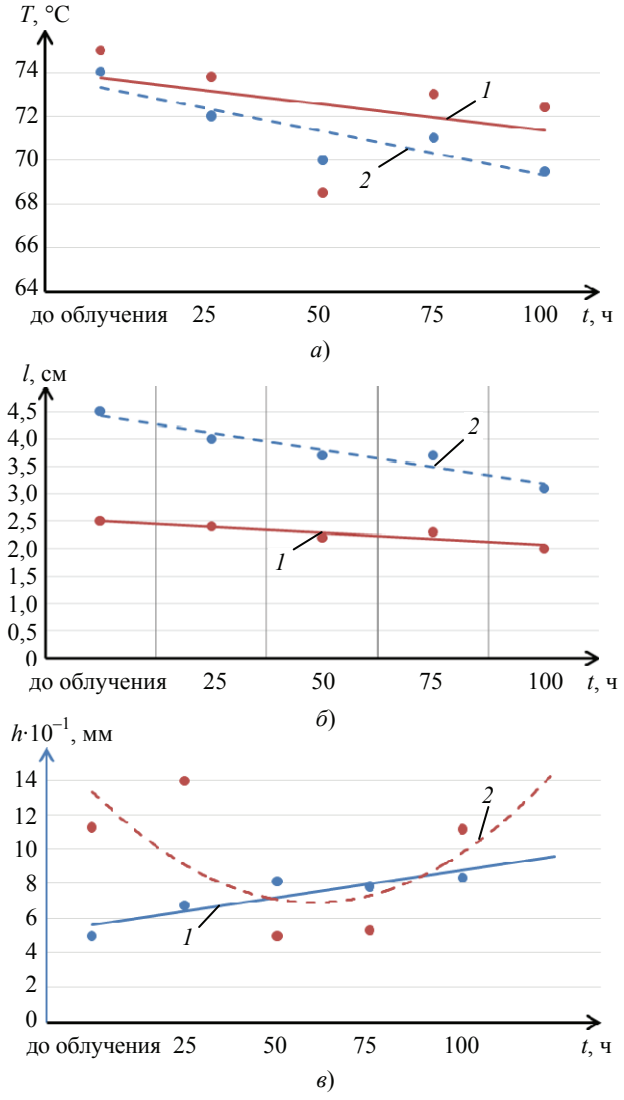


Рис. 3. Сравнительный анализ влияния УФ-облучения на битум марки БН 90/10 с наполнением (*1*) и без наполнения (*2*):
а – на температуру размягчения, *T* °С; *б* – растяжимость, *l*, см, при *T*=25 °С; *в* – глубину проникновения иглы, *h*, мм

0,063 ($y = –1,13x + 75,4$), с не наполненным битумом на температуру размягчения – $y = –1,13x + 75,4$. На рисунке 3, *б*, показаны графики, сравнивающие влияние УФ-облучения на битум, наполненный стеклянным порошком в соотношении 1:2 по *V* фракцией 0,063 ($y = –0,31x + 4,73$), с не наполненным битумом на растяжимость – $y = –0,31x + 4,73$; на рис. 3, *в*, – графики, сравнивающие влияние УФ-облучения на битум, наполненный стеклянным порошком в соотношении 1:2 по *V* фракцией 0,063 ($y = 0,783x + 4,873$), с не наполненным битумом на глубину проникновения иглы – $y = 1,1214x^2 – 7,6186x + 19,88$.

Из графика (рис. 3, *а*) видно, что битум, наполненный стеклянный порошком, имеет более высокую температуру размягчения, чем не наполненный битум. В течение всего срока ускоренного фотостарения у наполненного битума температура размягчения выше, чем у не наполненного битума, в среднем на 4 %. Угловой коэффициент, показывающий степень интенсивности протекания процесса старения битума, у наполненного и не наполненного битумов примерно одинаковый, то есть они стареют практически с одинаковой скоростью. Однако стоит отметить, что все же температура размягчения битума, наполненного стеклом, снижается под действием УФ-облучения менее интенсивно, чем у не наполненного [10].

Отмечено, что битум, наполненный боем стекла, имеет худшую растяжимость, чем не наполненный. В течение всего срока ускоренного фотостарения у наполненного битума растяжимость ниже, чем у не наполненного [11], но угловой коэффициент, показывающий степень интенсивности протекания процесса старения битума, у не наполненного – выше в 2,2 раза, чем у наполненного, то есть не наполненный битум стареет быстрее, чем наполненный. Это позволяет утверждать, что существует такое время облучения, после которого растяжимость битума, не наполненного стеклом, станет ниже, чем у наполненного битума.

Из графика (рис. 3, *в*) видно, что битум, наполненный боем стекла, имеет лучшую пенетрацию, чем не наполненный. В течение всего срока ускоренного фотостарения у наполненного битума пенетрация ниже, чем у не наполненного.

Выводы

Проведенные исследования показали, что выдвинутая гипотеза о возможности замедления процесса старения битумов путем добавления в них стеклянного порошка подтверждается. Дальнейшим развитием настоящей работы является установление экономической целесообразности такой модификации битума.

Список литературы

1. Прогнозирование характера обводнения и целесообразности проведения водоизоляционных работ / Р. Р. Кадыров, И. Г. Фаттахов, Е. Р. Хамидуллина, А. В. Патлай // Инженер-нефтяник. – 2012. – № 3. – С. 55 – 60.

2. Ярцев, В. П. Влияние эксплуатационных факторов на долговечность кровельных битумных материалов / В. П. Ярцев, М. В. Долженкова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2004. – Т. 10, № 4-2. – С. 1088 – 1093.

3. Ярцев, В. П. Повышение технологических и эксплуатационных характеристик строительного битума / В. П. Ярцев, Е. С. Полежаева // Кровельные и изоляционные материалы. – 2014. – № 6. – С. 14–15.

4. Ярцев, В. П. Влияние углеродных нанодобавок (таунит) на физико-механические характеристики и долговечность битума / В. П. Ярцев, Е. С. Полежаева, А. Ю. Бучнев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 17, № 4. – С. 1053 – 1058.

5. Муртазаев, С. А. Ю. Влияние тонкодисперсных микронаполнителей из вулканического пепла на свойства бетонов / С. А. Ю. Муртазаев, М. Ш. Саламанова, Р. Г. Бисултанов // Современные строительные материалы, технологии и конструкции : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 95-летию ФГБОУ ВПО «ГГНТУ им. акад. М. Д. Миллионщикова», 24 – 26 марта 2015 г., Грозный. – Грозный, 2015. – Т. 1. – С. 171 – 175.

6. Статистические методы в инженерных исследованиях (лабораторный практикум) : учеб. пособие / В. П. Бородюк, А. П. Вощинин, А. З. Иванов, В. А. Кабанов ; под. ред. Г. К. Круга. – М. : Высш. шк., 1983. – 216 с.

7. ГОСТ 11506–73. Битумы нефтяные. Метод определения температуры размягчения по кольцу и шару. – Взамен ГОСТ 11506–65 ; введ. 1974-07-01. – М. : Стандартинформ, 2008. – 7 с.

8. ГОСТ 11501–78. Битумы нефтяные. Метод определения глубины проникания иглы. – Взамен ГОСТ 11501–73 ; введ. 1980-01-01. – М. : Стандартинформ, 2008. – 7 с.

9. ГОСТ 11505–75. Битумы нефтяные. Метод определения растяжимости. – Взамен ГОСТ 11505–65 ; введ. 1977-01-01. – М. : Стандартинформ, 2008. – 4 с.

10. Ерофеев, А. В. Влияние УФ-облучения на растяжимость битума / А. В. Ерофеев, М. С. Попов, В. А. Михайлов // Синергия наук. – 2017. – № 12. – С. 1052 – 1057.

11. Попов, М. С. Влияние УФ-облучения на температуру размягчения битума / М. С. Попов, А. В. Ерофеев, В. А. Михайлов // Современные технологии : актуальные вопросы, достижения и инновации : сб. ст. победителей VIII Междунар. науч.-практ. конф., 23 июня 2017 г., Пенза. – Пенза, 2017. – С. 35 – 37.

Improving the Performance Characteristics of BN 90/10 Brand Bitumen by Filling it with Glass Powder

A. V. Erofeev, V. A. Mikhailov

Department of Construction of Buildings and Structures, AV.Erofeev@yandex.ru; TSTU, Tambov, Russia

Keywords: BN 90/10 brand bitumen; bitumen filling; penetration of bitumen; elongation; softening temperature; ultraviolet radiation.

Resume: Oil bitumen of the BN 90/10 brand is currently widely used in construction as a waterproofing material. However, over time, there is a sharp aging and deterioration of its characteristics. The deterioration in the operational characteristics of BN 90/10 brand bitumen under the influence of ultraviolet radiation was studied. It is proposed to slow down the aging process by increasing the values of the initial characteristics. It is shown that such an effect can be achieved by filling bitumen with glass powder. To establish the optimal content, mathematical planning of the experiment was carried out with subsequent experimental verification of the results. As a filler, glass powder of two fractions was used: 0.15 and 0.063. Based on the verification of the significance of the coefficients of the obtained regression equation, it was found that the addition of bitumen glass powder fraction 0.15 is not appropriate. The optimum ratio of glass to bitumen is 1: 1.75 by volume V with a fraction of glass powder of 0.063, which was shown by a further experiment.

References

1. Kadyrov R.R., Fattakhov I.G., Khamidullina E.R., Patlay A.V. [Predicting the nature of flooding and the appropriateness of water-proofing works], *Inzhener-neftyanik* [Oil engineer], 2012, no. 3, pp. 55-60. (In Russ.)

2. Yartsev V.P., Dolzhenkova M.V. [Influence of operational factors on the durability of roofing bitumen materials], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2004, vol. 10, no. 4-2, pp. 1088-1093. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Yartsev V.P., Polezhayeva Ye.S. [Improving the technological and operational characteristics of building bitumen], *Krovel'nyye i izolyatsionnyye materialy* [Roofing and insulation materials], 2014, no. 6, pp. 14-15. (In Russ.)

4. Yartsev V.P., Polezhayeva Ye.S., Buchnev A.Yu. [Influence of carbon nano-additives (taunite) on the physicomechanical characteristics and durability of bitumen], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2011, vol. 17, no. 4, pp. 1053-1058. (In Russ., abstract in Eng.)

5. Murtazayev S.A.Yu., Salamanova Sh., Bisultanov R.G. *Sovremennyye stroitel'nyye materialy, tekhnologii i konstruktsii: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 95-letiyu FGBOU VPO «GGNTU im. akad. M. D. Millionshchikova»* [Modern building materials, technologies and designs: materials International scientific and practical conference dedicated to the 95th anniversary of FSBEI HPE "GSTU named after Acad. M. D. Millionshchikova"], 24-26 March, 2015, Grozny, 2015, vol. 1, pp. 171-175. (In Russ.)

6. Borodyuk V.P., Voshchinin A.P., Ivanov A.Z., Kabanov V.A., Krug G.K. [Ed.] Statisticheskiye metody v inzhenernykh issledovaniyakh (laboratornyy praktikum): uchebnoye posobiye [Statistical methods in engineering research (laboratory workshop): textbook], Moscow: Vysshaya shkola, 1983, 216 p. (In Russ.)

7. *GOST 11506–73. Bitumy neftyanyye. Metod opredeleniya temperatury razmyagcheniya po kol'tsu i sharu* [GOST 11506–73. Oil bitumen. The method of determining the softening temperature of the ring and ball], Moscow: Standartinform, 2008, 7 p. (In Russ.)

8. *GOST 11501–78. Bitumy neftyanyye. Metod opredeleniya glubiny pronikaniya igly* [GOST 11501–78. Oil bitumen. Method for determining the depth of penetration of the needle], Moscow: Standartinform, 2008, 7 p. (In Russ.)

9. *GOST 11505–75. Bitumy neftyanyye. Metod opredeleniya rastyazhimosti* [GOST 11505–75. Oil bitumen. Method for determining elongation], Moscow: Standartinform, 2008, 4 p. (In Russ.)

10. Yerofeyev A.V., Popov M.S., Mikhaylov V.A. [Influence of UV irradiation on the elongation of bitumen], *Sinergiya nauk* [Synergy of Sciences], 2017, no. 12, pp. 1052-1057. (In Russ., abstract in Eng.)

11. Popov M.S., Yerofeyev A.V., Mikhaylov V.A. *Sovremennyye tekhnologii: aktual'nyye voprosy, dostizheniya i innovatsii: sbornik statey pobediteley VIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modern technologies: current issues, achievements and innovations: collection of articles by winners VIII International Scientific and Practical Conference], 23 June, 2017, Penza, 2017, pp. 35-37. (In Russ.)

Verbesserung der Leistung von Bitumen der Marke BN 90/10 durch Füllen mit Glaspulver

Zusammenfassung: Erdölbitumen der Marke BN 90/10 hat derzeit eine breite Anwendung im Bauwesen als Abdichtungsmaterial gefunden. Im Laufe der Zeit kommt es jedoch zu einer starken Alterung und Verschlechterung seiner Eigenschaften.

Die Verschlechterung der Betriebseigenschaften von Bitumen BN 90/10 ist unter der Wirkung ultravioletter Strahlung untersucht. Es ist vorgeschlagen, den Alterungsprozess durch Erhöhen der Werte der ursprünglichen Eigenschaften zu verlangsamen. Es ist gezeigt, dass ein solcher Effekt durch Füllen von Bitumen mit Glaspulver erzielt werden kann. Um den optimalen Inhalt zu ermitteln, wurde eine mathematische Planung des Experiments mit anschließender experimenteller Überprüfung der erhaltenen Ergebnisse durchgeführt. Als Füllstoff wurde ein Glaspulver mit zwei Fraktionen verwendet: 0,15 und 0,063. Basierend auf der Überprüfung der Signifikanz der Koeffizienten der erhaltenen Regressionsgleichung ist festgestellt, dass die Zugabe einer 0,15-Fraktion Glaspulver zu Bitumen nicht ratsam ist. Das optimale Verhältnis von Glas zu Bitumen beträgt 1: 1,75 volumetrisch *V* mit einer Glaspulverfraktion von 0,063, was ein weiteres Experiment gezeigt hat.

Augmentation des performances du bitume de qualitéla marque BN 90/10 par le remplissage de poudre de verre

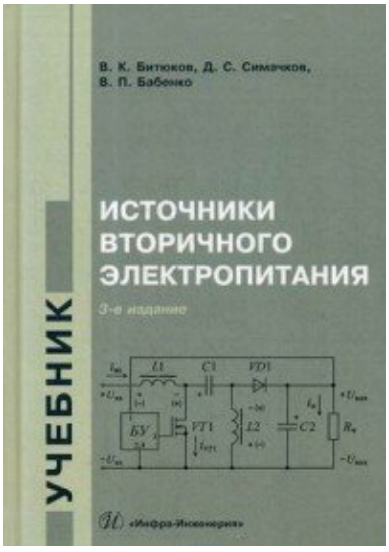
Résumé: Le bitume de Pétrole BN 90/10 est actuellement largement utilisé dans la construction en tant que matériau d'étanchéité. Cependant avec le temps il arrive un vieillissement brutal et une détérioration des caractéristiques. Est étudiée la détérioration des caractéristiques de performance du bitume de la marque BN 90/10 sous l'action de l'irradiation ultraviolette. Est proposé de retarder le processus du vieillissement en augmentant les caractéristiques initiales. Est démontré qu'un tel effet peut être obtenu en remplissant le bitume avec de la poudre de verre. Pour établir le remplissage optimal, est réalisée une planification mathématique de l'expérience suivie d'une vérification expérimentale des résultats obtenus. La poudre de verre de deux fractions est utilisée comme charge: 0,15 et 0,063. A la base de la vérification de l'importance des coefficients de l'équation de régression obtenue, il est établi que l'addition d'une fraction de 0,15 dans le bitume de poudre de verre n'est pas appropriée. Le rapport optimal entre le verre et le bitume est de 1:1,75 en volume V avec une fraction de poudre de verre de 0,063, ce qui a montré l'expériment suivant.

Авторы: ***Ерофеев Александр Владимирович*** **–** кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструкции зданий и сооружений»; ***Михайлов Владислав Андреевич*** – магистрант, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: ***Гончарова Маргарита Александровна*** – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Строительное материаловедение и дорожные технологии», ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», г. Липецк, Россия.

Информация

Рецензия на учебник «Источники вторичного электропитания»



Неотъемлемая составляющая технических систем – источники вторичного электропитания (**ИВЭ**), что предполагает в технических университетах постановку и чтение дисциплины «Источники вторичного электропитания» и близких к ней дисциплин, содержащих широкий круг разнородных и часто не связанных друг с другом вопросов.

Отметим, что значимость названной дисциплины существенно возросла в последние десять лет, которые характеризуются бурным развитием и внедрением цифровой техники и, естественно, цифровых методов обработки сигналов. Однако заметен дефицит учебной литературы по энергообеспечению наукоемких устройств и систем. По этой причине в настоящее время сложилась парадоксальная ситуация, при которой даже высококвалифицированные разработчики аппаратуры оказались весьма далекими от аналоговой схемотехники, в то время как именно аналоговый сигнал является первичным носителем информации. Поэтому выход в свет учебника «Источники вторичного электропитания» авторов В. К. Битюкова, Д. С. Симачкова, В. П. Бабенко является весьма своевременным.

В рецензируемом учебнике в доступной форме рассмотрены структуры типовых устройств и систем электропитания, представляющих в большинстве случаев комбинацию аналоговых и импульсных технологических решений. Граница выбора аналоговой или импульсной реализации ИВЭ для конкретного промышленного приложения зависит от доступной элементной базы и степени квалификации разработчика устройства.

При рассмотрении физики и схемотехники ИВЭ особое внимание уделено линейным устройствам. Такие решения привлекательны для использования в стационарном оборудовании, когда важны короткие сроки разработки и невысокая стоимость, а недостаточно высокий КПД особой роли не играет.

Значительное внимание в работе уделено более эффективным и гибким в использовании импульсным ИВЭ, обладающим лучшими массогабаритными характеристиками и меньшим тепловыделением, однако, более дорогостоящим, требующим больше времени на разработку.

Современное структурное и схемное проектирование силовых устройств основано на использовании мощных аналоговых и цифровых микросхем, номенклатура которых чрезвычайно разнообразна. Поэтому оправдано представление в учебнике широкой палитры полупроводниковых приборов как на основе дискретных приборов, таких как силовые диоды, тиристоры, транзисторы со структурой BJT, MOSFET и IGBT, так и специализированных интегральных микросхем для построения DC/DC-преобразователей, линейных и импульсных стабилизаторов напряжения и тока.

Несомненное достоинство учебника – раздел, посвященный формированию у читателя еще на студенческой скамье методологии метрологической культуры и навыков экспериментального и аналитического исследований характеристик и параметров как отдельных функциональных узлов устройств электропитания, так и ИВЭ в целом.

Учебник «Источники вторичного электропитания», предназначенный для студентов, несомненно будет интересен и полезен для широкого круга читателей, которые хотят расширить свои знания о процессах, происходящих в радиоэлектронных компонентах и узлах аппаратуры.

Книга написана хорошим техническим языком, тщательно структурирована, с разделами и подразделами по актуальным вопросам, содержит значительное количество выверенных электрических схем с соответствующим описанием.

Материал учебника дан на основе лекционных, лабораторных и практических занятий авторов в РТУ МИРЭА. Книга рассчитана на читателя, знакомого с основами электротехники и электроники. Ее можно использовать не только в качестве руководства при разработке того или иного источника питания, но и как методическое пособие при курсовом и дипломном проектировании.

Ограниченный объем учебника не позволил рассмотреть все вопросы, связанные с проектированием ИВЭ, в том числе столь важный раздел, как цифровая и микропроцессорная техника применительно к функциям управления и защиты, а также вопросы обеспечения тепловых режимов термонагруженных элементов и блоков и их неразрушающего контроля на всех этапах жизненного цикла.

В целом следует отметить, что учебник «Источники вторичного электропитания» является своевременной методической работой и будет способствовать повышению качества подготовки бакалавров, специалистов и магистров.

При цитировании данного учебника использовать:

Битюков, В. К. Источники вторичного электропитания : учебник / В. К. Битюков, Д. С. Симачков. В. П. Бабенко. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Инфра-Инженерия, 2019. – 376 с.

Профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», д-р техн. наук, Д. Ю. Муромцев

Профессор кафедры «Мехатроника и технологические измерения», д-р техн. наук, С. В. Пономарев

Ковалева Ольга Александровна

Kovaleva Olga

Научный сотрудник Научно-образовательного центра «ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» – ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве» (в области безотходных и малоотходных технологий)», г. Тамбов.

29 января 2019 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.06 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитила диссертацию на тему «Научные и прикладные основы разработки и повышения эффективности электробаромембранных процессов разделения технологических растворов в химических, машиностроительных и биохимических производствах» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.17.03 – Технология электрохимических процессов и защита от коррозии.

Работа выполнена в Научно-образовательном центре ФГБОУ ВО «ТГТУ» – ФГБНУ «ВНИИТиН» и на кафедре «Прикладная геометрия и компьютерная графика» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

Научный консультант – доктор технических наук, профессор С. И. Лазарев.

В диссертации разработаны научные и прикладные основы создания и повышения эффективности электробаромембранных процессов разделения технологических растворов химических, машиностроительных и биохимических производств. Предложен комплексный подход по повышению эффективности электробаромембранных процессов разделения технологических растворов исследуемых производств. Разработаны и внедрены методики расчета конструкции аппаратов, технологические схемы и результаты исследований по кинетическим характеристикам мембран при проведении процессов электробаро- и баромембранного разделения растворов исследуемых производств. Создан метод расчета камер корпуса электробаромембранного аппарата плоскокамерного типа в условиях действия трансмембранного давления, учитывающий наличие дренажной сетки, и сформулированы условия, позволяющие обеспечить прочность и жесткость тонкой разделяющей стенки и ее узлов, а также отвод раствора прикатодного и прианодного пермеатов из камер для различных схем подключения электродов. Представлены рекомендации по повышению эффективности электробаромембранных процессов разделения исследуемых растворов и конструкций разделительных аппаратов на их основе.

Приказом Минобрнауки России от 09 июля 2019 года № 622/нк Ковалевой О. А. присуждена ученая степень доктора технических наук наук.

Область научных исследований: процессы электробаромембранного разделения технологических растворов химических, машиностроительных и биохимических производств.

Козадерова Ольга Анатольевна

Kozaderova Olga

Доцент кафедры неорганической химии и химической технологии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», г. Воронеж.

22 октября 2019 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.06 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитила диссертацию на тему «Научные основы и технологическое применение электродиализа водных растворов, содержащих сильные и слабые электролиты» на соискание ученой степени доктора химических наук по специальности 05.17.03 – Технология электрохимических процессов и защита от коррозии.

Работа выполнена на кафедре неорганической химии и химической технологии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий».

Научный консультант – доктор химических наук, профессор С. И. Нифталиев.

В диссертации разработаны научные основы технологического применения электродиализа водных растворов, содержащих сильные и слабые электролиты, как экологически перспективного способа эффективной электромембранной переработки растворов химического и гальванического производств. Предложена физико-химическая модель электропроводности катионообменной мембраны, содержащей ионы слабого электролита, которая учитывает влияние водородных ионов, образовавшихся в ходе гидролиза во внешнем и внутреннем растворах, на электропроводность гелевой фазы мембраны и позволяет интерпретировать концентрационные зависимости электропроводности в электромембранных системах, содержащих катионы слабых оснований. Изложены результаты исследования концентрационных зависимостей удельной электропроводности катионообменных мембран в растворах, содержащих катионы слабого основания, токовых зависимостей производительности по ионам соли при электродиализе для таких электромембранных систем. Раскрыта взаимосвязь между физико-химическими, структурными характеристиками гетерогенных ионообменных мембран разного типа и эффективностью переноса ионов при электродиализе растворов, содержащих сильные и слабые электролиты. Проведена модернизация микрогетерогенной модели ионного транспорта в гетерогенной мембране, которая заключается в описании гелевой фазы гетерогенных образцов как системы с двумя типами катионов – переносчиков заряда. Создана компьютерная программа, имитирующая работу лабораторной электродиализной установки периодического типа для обработки нитрата аммония.

Приказом Минобрнауки России от 05 марта 2020 года № 295/нк Козадеровой О. А. присуждена ученая степень доктора химических наук.

Область научных исследований: технологии эффективной электромембранной переработки растворов химического и гальванического производств.

Бабкин Александр Викторович

Младший научный сотрудник Научно-образовательного центра «ТГТУ – ИПХФ РАН в области нанотехнологий и новых материалов», старший преподаватель кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов» ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов.

5 декабря 2019 года на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.080.03, созданного при ФГБОУ ВО «ТГТУ», ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А.» защитил диссертацию на тему «Синтез, физико-химические и функциональные свойства композиционного сорбционного материала на основе модифицированного оксида графена» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.08 – Нанотехнологии и наноматериалы (химия и химическая технология).

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент А. Е. Бураков.

Работа выполнена на кафедре «Техника и технологии производства нанопродуктов» и в Центре коллективного пользования научным оборудованием по направлению «Получение и применение полифункциональных наноматериалов» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

Область научных интересов: синтез композиционных сорбционных материалов на основе оксида графена, исследование физико-химических характеристик и функциональных свойств графеновых композитов в процессах очистки водных сред.

Буланов Евгений Владимирович

Аспирант кафедры «Мехатроника и технологические измерения» ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов.

19 декабря 2019 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.01 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитил диссертацию на тему «Повышение точности измерения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов с применением метода плоского импульсного источника теплоты» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий.

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент А. Г. Дивин.

Работа выполнена на кафедре «Мехатроника и технологические измерения» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

Область научных интересов: разработка методов и средств контроля теплофизических характеристик теплоизоляционных материалов.

Нескоромная Елена Анатольевна

Младший научный сотрудник Научно-образовательного центра «ТГТУ – ИПХФ РАН в области нанотехнологий и новых материалов», старший преподаватель кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов» ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов.

5 декабря 2019 года на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.080.03, созданного при ФГБОУ ВО «ТГТУ», ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А.» защитила диссертацию

на тему «Синтез нанокомпозиционных гидро- и аэрогелей на основе графена, декорированного наночастицами оксидов железа, для сорбционной очистки водных сред» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.08 – Нанотехнологии и наноматериалы (химия и химическая технология).

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент А. Е. Бураков.

Работа выполнена на кафедре «Техника и технологии производства нанопродуктов» и в Центре коллективного пользования научным оборудованием по направлению «Получение и применение полифункциональных наноматериалов» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

Область научных интересов: синтез и исследование свойств нанокомпозиционных гидро- и аэрогелей на основе графена, исследование методов гидротермальной карбонизации и технологий сверхкритических флюидов.

Пирожкова Татьяна Сергеевна

Инженер Научно-исследовательского института «Нанотехнологии и наноматериалы» ФГБОУ ВО «ТГУ имени Г. Р. Державина», г. Тамбов.

4 декабря 2019 года на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.080.03, созданного при ФГБОУ ВО «ТГТУ», ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А.» защитила диссертацию на тему «Структура, свойства и технология синтеза нанокомпозиционных циркониевых керамик с улучшенными трибологическими характеристиками» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 15.16.08 – Нанотехнологии и наноматериалы (химия и химическая технология).

Научный руководитель – Заслуженный деятель науки РФ, доктор физико-математических наук, профессор Ю. И. Головин.

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте «Нанотехнологии и наноматериалы» ФГБОУ ВО «ТГУ имени Г. Р. Державина».

Область научных интересов: синтез нанокомпозиционных керамик и изучение трибологических характеристик материалов в микро- и наношкале.

Рязанов Илья Георгиевич

Инженер-конструктор II-й категории ПАО «Тамбовский завод «Электроприбор», г. Тамбов.

25 декабря 2019 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.05 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитил диссертацию на тему «Определение оптимальной периодичности технического обслуживания информационно-измерительной и управляющей системы с применением нейросетевых технологий» на соискание ученой степени кандидата химических наук по специальности 05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы (технические науки).

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Ю. Т. Зырянов.

Работа выполнена на кафедре «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

Область научных интересов: методы анализа технического состояния, диагностики и идентификации информационно-измерительных и управляющих систем, обеспечивающие повышение эксплуатационных и технико-экономических характеристик за счет оптимальной периодичности технического обслуживания.

Указатели к тому 25, 2019

СОДЕРЖАНИЕ ТОМА 25, 2019

(по рубрикам;
в алфавитном порядке авторов)

Автоматика. Информатика. Управление. Приборы

Авцинов И. А., Емельянов А. Е., Ивлиев М. Н. Исследование влияния буферизации данных на качество управления в сетевых системах ..... 063 – 071

Алгазин Е. И. Анализ состояния линейных систем автоматики ..... 250 – 255

Алгазин Е. И. Точность оценки состояния линейных систем автоматики .. 437 – 441

Алехин П. А., Глебов А. О., Карпов С. В., Карпушкин С. В., Хлебников В. А. Разработка алгоритма отображения результатов топологической оптимизации при решении двумерных задач стационарной теплопроводности ..... 022 – 035

Артемова С. В., Артемов А. А., Чернышов Н. Г., Каменская М. А. Интеллектуальная система энергосберегающего управления асинхронными двигателями (*на английском языке*) ..... 374 – 380

Битюков В. К., Авцинов И. А., Суханова Н. В. К вопросу разработки систем управления операций сортировки штучных деталей по массе на пневматических устройствах ..... 526 – 534

Глистин В. Н., Панасюк Ю. Н. Применение динамических данных воздушного судна в угломерном канале информационно-измерительных систем... 190 – 196

Гончаренко В. И., Лебедев Г. Н., Михайлин Д. А. Планирование полета группы беспилотных летательных аппаратов для обнаружения отделяемых частей ракет-носителей ..... 381 – 394

Горбунов А. В., Непрокин А. В., Туголуков Е. Н., Егоров В. С. Современные системы дифференциальной диагностики вестибулярных нарушений. 241 – 249

Захаров А. Ю., Обухов А. Д., Дедов Д. Л. Постановка задачи структурно-параметрического синтеза системы имитации изолирующих дыхательных аппаратов ..... 412 – 422

Зацепина В. И., Зацепин Е. П., Скоморохов П. И. Анализ воздействия негативных сетевых возмущений резкопеременного характера на эффективность функционирования систем электроснабжения ..... 560 – 566

CONTENTS OF VOLUME 25, 2019

(by the main topics;
in the authors alphabet)

Automation. Information Technology. Control. Instruments

Avtsinov I. A., Emelyanov A. E., Ivliev M. N. Investigating the Effect of Data Buffering on the Quality of Network Control Systems

Algazin E. I. Analysis of the State of Linear Automation Systems

Algazin E. I. Accuracy of Assessing the State of Linear Automation Systems

Alekhin P. A., Glebov A. O., Karpov S. V., Karpushkin S. V., Khlebnikov V. A. Development of an Algorithm for Displaying the Topological Optimization Results in Two-Dimensional Problems of Stationary Heat Conduction

Artemova S. V., Artemov A. A., Chernyshov N. G., Kamenskaya M. A. Intelligent Energy-Saving Induction Motor Control System (*in English*)

Bityukov V. K., Avtsinov I. A., Sukhanova N. V. Developing Control Systems for Sorting Piece Parts by Weight on Pneumatic Devices

Glistin V. N., Panasyuk Yu. N. Application of Dynamic Aircraft Data in the Goniometric Channel of Information Measuring Systems

Goncharenko V. I., Lebedev G. N., Mikhaylin D. A. Flight Planning for Unmanned Aerial Vehicle Group to Detect Separate Parts of Boosters

Gorbunov A. V., Neprokin A. V., Tugolukov E. N., Egorov V. S. Modern Differential Diagnostic Systems for Vestibular Disorders

Zakharov A. Yu., Obukhov A. D., Dedov D. L. Statement of the Problem of Structural-Parametric Synthesis of Self-Contained Breathing Apparatus Simulation

Zatsepina V. I., Zatsepin E. P., Skomorokhov P. I. Analysis of the Impact of Negative Network Disturbances of Rapidly Changing Nature on the Efficiency of the Functioning of Power Supply Systems

Иванов А. В., Москвитин С. П., Сурков В. О. Исследование комплексных адаптивных алгоритмов обработки информации для навигационных систем подвижных наземных объектов ..... 395 – 405

Ivanov A. V., Moskvitin S. P., Surkov V. O. Research into Complex Adaptive Information Processing Algorithms for Navigation Systems of Moving Ground Objects

Корнилов К. С., Карпушкин С. В., Мокрозуб В. Г. Автоматизированное проектирование элементов прессового оборудования. Часть 2. Структура и модели системы поддержки принятия решений ..... 360 – 373

Kornilov K. S., Karpushkin S. V., Mokrozub V. G. Automated Design of Press Equipment Parts. Part 2. Structure and Models of a Decision Support System

Лаухин И. Р., Майстренко Н. В., Коробова И. Л. Учет и моделирование рисков в сетевом графике загрузочных работ..... 423 – 430

Laukhin I. R., Maistrenko N. V., Korobova I. L. Risk Accounting and Risk Modeling in a Logistics Network

Малыгин Е. Н., Краснянский М. Н., Туголуков Е. Н., Алексеев С. Ю. Структурно-параметрический синтез системы поддержки принятия решений при проектировании и эксплуатации тепло- и массообменного оборудования ..... 350 – 359

Malygin E. N., Krasnyansky M. N., Tugolukov E. N., Alekseev S. Yu. Structural and Parametric Synthesis of a Decision Support System in the Design and Operation of Heat and Mass Transfer Equipment

Масленников Д. А., Катаева Л. Ю., Ильичева М. Н., Лощилов А. А. Моделирование взаимодействия лесного пожара и импульсного воздействия с использованием схем высокого порядка точности ..... 547 – 559

Maslennikov D. A., Kataeva L. Yu., Ilyicheva M. N., Loshchilov A. A. Modeling the Interaction of Forest Fires and Impulse Effects Using High Accuracy Schemes

Мордасов М. М., Мордасов М. Д., Мозгова Г. В. Пневматический метод и устройство контроля плотности жидкостей ..... 406 – 411

Mordasov M. M., Mordasov M. D., Mozgova G. V. Pneumatic Method and Fluid Density Control Device

Наимов У. Р. Оценивание координат беспилотного летательного аппарата на основе модели маневренного движения 236 – 240

Naimov U. R. Estimating Coordinates of Unmanned Aerial Vehicle Based on the Maneuvering Movement Model

Немтинов В. А., Родина А. А., Немтинова Ю. В. Разработка электронной модели гальванической системы 567 – 579

Nemtinov V. A., Rodina A. A., Nemtinova Yu. V. Development of Electronic Model for Electroplating System

Пономарев С. В., Мищенко С. В., Мищенко Е. С., Аль-Бусаиди С. С. С. Оценка индикатора возможности улучшения и выполнение мероприятий по повышению результативности и эффективности процессов системы менеджмента качества в образовательной организации..... 072 – 085

Ponomarev S. V., Mishchenko S. V., Mishchenko E. S., Al-Busaidi S. S. S. Assessing the Indicator for Improvement Possibility of the Effectiveness and Efficiency of the Quality Management System in an Educational Organization

Рогачёв А. И., Сустин А. И., Панасюк Ю. Н., Пудовкин А. П., Данилов С. Н. Применение калмановской фильтрации для метода динамических весовых коэффициентов в третичной обработке информации..... 047 – 052

Rogachev A. I., Sustin A. I., Panasyuk Yu. N., Pudovkin A. P., Danilov S. N. Application of Kalman Filtering for the Method of Dynamic Weights in Tertiary Information Processing

Рязанов И. Г., Чернышов Н. Г., Зырянов Ю. Т., Наумова А. Ю. Определение оптимальной периодичности технического обслуживания информационно-измерительных и управляющих систем с применением нейросетевых технологий ..... 197 – 205

Ryazanov I. G., Chernyshov N. G., Zyryanov Yu. T., Naumova A. Yu. Finding an Optimal Periodicity of Technical Maintenance of Information-Measuring and Control Systems Using Neural Network Technologies

Саиф М. Н. М., Матвейкин В. Г., Дмитриевский Б. С., Башкатова А. В., Мамонтов А. А. Математические модели многосвязных объектов управления..... 053 – 062

Саиф М. Н. М., Матвейкин В. Г., Дмитриевский Б. С., Башкатова А. В., Мамонтов А. А. Управление объектами с взаимосвязанными величинами .... 206 – 218

Старун И. Г., Юганcон А. Н., Гатчин Ю. А. Построение математической модели расчета комплексной оценки VPN ..... 535 – 546

Тимофеев А. М. Влияние времени однофотонной передачи информации на вероятность ошибочной регистрации данных асинхронных квантово-криптографических каналов связи ..... 036 – 046

Тихомиров С. Г., Подвальный С. Л., Попов А. П., Неизвестный О. Г. Синтез структуры прогнозирующей модели системы управления реактором дегидрирования этилбензола ..... 006 – 021

Фролов С. С. Метод понижения погрешности измерения концентрации глюкозы неинвазивным спектрофотометром..... 225 – 235

Чашкина Т. В., Коробова И. Л., Майстренко Н. В. Применение ресурсной модели в вычислениях по автоматизации управления складом ..... 219 – 224

Чернышов В. А., Печагин Е. А., Кочергин С. В. Стационарный регистратор токов замыкания на корпус – дополнительная функциональная опция защитного заземления ..... 431 – 436

Чернышова Т. И., Курносов Р. Ю., Каменская М. А. Оценка метрологической надежности аналого-цифрового преобразователя в структуре информационно-измерительной системы на этапе проектирования..... 180 – 189

Процессы и аппараты химических и других производств. Химия

Абоносимов О. А., Лазарев С. И., Зарапина И. В., Котенев С. И., Игнатов Н. Н. Критериальные зависимости процесса массопереноса электробаромембранного разделения технологических растворов от тяжелых металлов..... 442 – 452

Алексеева Н. В., Литницкий В. Ю., Куликов А. Я. Ультрафильтрационное разделение промывных вод производства пигментов алого, желтого и оранжевого ..... 282 – 288

Аррусси М., Менсах Ж., Аррусси А. Влияние содержания воды, pH, солености и температуры на стабильность и поверхностное натяжение российской нефти марки Urals (*на английском языке*) . 256 – 270

Saif M. N. M., Matveykin V. G., Dmitrievsky B. S., Bashkatova A. V., Mamontov A. A. Mathematical Models of Multiply-Connected Control Objects

Saif M. H. M., Matveykin V. G., Dmitrievsky B. S., Bashkatova A. V., Mamontov A. A. Control of Objects with Interrelated Values

Starun I. G., Yuganson A. N., Gatchin Yu. A. Building a Mathematical Model of Calculation for VPN Integrated Assessment

Timofeev A. M. The Effect of Single Photon Transmission Time on the Probability of Erroneous Registration of Asynchronous Data of Quantum Cryptographic Communication Channels

Tikhomirov S. G., Podvalnyy S. L., Popov A. P., Neizvestnyy O. G. Synthesis of the Structure of a Predictive Model of Control System for Ethylbenzene Dehydrogenation Reactor

Frolov S. S. A Method for Reducing Glucose Concentration Measurement Error with a Non-Invasive Spectrophotometer

Chashkina T. V., Korobova I. L., Maistrenko N. V. Application of the Resource Model in Calculations for Computer-Aided Warehouse Management

Chernyshov V. A., Pechagin E. A., Kochergin S. V. Stationary Short Circuit Current Recorder as an Additional Functional Protective Earthing Option

Chernyshova T. I., Kurnosov R. Yu., Kamenskaya M. A. Metrological Reliability Assessment of Analog-to-Digital Converter in the Structure of the Information-Measuring System at the Design Stage

Chemical and Related Engineering. Chemistry

Abonosimov O. A., Lazarev S. I., Zarapina I. V., Kotenev S. I., Ignatov N. N. Criteria Dependences of the Mass Transfer Process of the Electrobaromembrane Separation of Technological Solutions from Heavy Metals

Alekseeva N. V., Litnitsky V. Yu., Kulikov A. Ya. Ultrafiltration Separation of Washing Water for Production of Scarlet, Yellow and Orange Pigment

Arroussi M., Mensah J., Arroussi A. The Effect of Water Content, pH, Salinity and Temperature on the Stability and Surface Tension of Russian Urals Crude Oil Emulsion (*in English*)

Балобаева Н. Н., Брянкин К. В., Рухов А. В., Дегтярев А. А. Квантово-химическое описание механизма топохимической реакции термического разделения компонентов нефти на поверхности наночастиц никеля	453 – 460	**Balobaeva N. N., Bryankin K. V., Rukhov A. V., Degtyarev A. A.** Quantum-Chemical Description of the Mechanism of the Topochemical Reaction of Thermal Separation of Oil Components on Nickel Nanoparticle Surface
Голованчиков А. Б., Прохоренко Н. А., Меренцов Н. А., Смольская Д. О., Баранов Д. М. Определение оптимального диаметра труб в двухтрубном теплообменнике	271 – 281	**Golovanchikov A. B., Prokhorenko N. A., Merentsov N. A., Smolskaya D. O., Baranov D. M.** Determination of Optimum Pipe Diameter in a Two-Pipe Heat Exchanger
Долгунин В. Н., Слепых А. В., Пронин В. А. К разработке технологии и аппаратурного оформления производства субстрата из целлюлозосодержащего сырья	595 – 602	**Dolgunin V. N., Slepykh A. V., Pronin V. A.** To the Development of Technology and Hardware Design Production of a Substrate from Cellulose-Containing Raw Materials
Дуран Дельгадо О. А., Скибина Л. М. Влияние органического растворителя на эффективность глицина при электровосстановлении ионов кадмия	635 – 643	**Duran Delgado O. A., Skibina L. M.** The Effect of Organic Solvent on the Effectiveness of Glycine in the Electroreduction of Cadmium Ions
Ефремов Н. Ф., Будникова О. А., Канаичева А. В., Иванова М. А. Анизотропия свойств рукавных пленок ПЭВД при физической модификации в экструзионной установке	461 – 474	**Efremov N. F., Budnikova O. A., Kanaicheva A. V., Ivanova M. A.** Anisotropy Properties of High-Density Polyethylene Sleeve Films during Physical Modification in an Extrusion Machine
Капранова А. Б., Верлока И. И., Яковлев П. А., Бахаева Д. Д. О влиянии комплексного параметра гравитационного аппарата на качество смеси после первой стадии смешивания	092 – 097	**Kapranova A. B., Verloka I. I., Yakovlev P. A., Bakhaeva D. D.** On the Influence of a Complex Parameter of the Gravitational Apparatus on the Quality of the Mixture after the First Stage of Mixing
Коновалов Д. Н., Ковалев С. В., Лазарев С. И., Луа П., Бернацкий П. Н., Прохоренков В. Д. Вольтамперные и омические характеристики электромембранной очистки гальванических стоков от ионов NH_4^+, Zn^{2+}, NO_3^-, SO_4^{2-}, PO_4^{3-}	612 – 621	**Konovalov D. N., Kovalev S. V., Lazarev S. I., Lua P., Bernatsky P. N., Prokhorenkov V. D.** Volt-Ampere and Ohmic Characteristics of Electro-Membrane Cleaning of Galvanic Drains from Ions NH_4^+, Zn^{2+}, NO_3^-, SO_4^{2-}, PO_4^{3-}
Леонтьева А. И., Субочева М. Ю., Брянкин К. В., Рудакова А. Б. Оптимизация технологических режимов обезвоживания органических пигментов и красителей с учетом их термоустойчивости	603 – 611	**Leontieva A. I., Subocheva M. Yu., Bryankin K. V., Rudakova A. B.** Optimization of Technological Modes of Dehydration of Organic Pigments and Dyes Given Their Heat Resistance
Образцова Е. Ю., Дегтярев А. А., Рухов А. В., Бакунин Е. С. Физико-химические особенности коллоидной устойчивости в полярных растворителях оксида нанографита, синтезированного электрохимическим способом	116 – 122	**Obraztsova E. Yu., Degtyarev A. A., Rukhov A. V., Bakunin E. S.** Physical and Chemical of Properties Colloidal Stability in Polar Solvents of Nanographite Oxide Synthesized by Electrochemical Method
Промтов М. А., Степанов А. Ю. Интенсификация процесса экстрагирования в роторном импульсном аппарате с профилированным ротором	086 – 091	**Promtov M. A., Stepanov A. Yu.** Intensification of the Extraction Process in the Rotary Pulse Device with a Profiled Rotor
Рухов А. В., Дегтярев А. А., Тришина А. В., Рухов А. В. Исследование механизма появления и состава высолов на поверхности цементно-стружечных плит	296 – 303	**Rukhov A. V., Degtyarev A. A., Trishina A. V., Rukhov A. V.** A Study of the Mechanism of Origin and Composition of Efflorescence on the Surface of Cement Bonded Particle Boards

Севостьянов В. С., Уральский В. И., Бойчук И. П., Ермилов Р. А. Теоретические и экспериментальные исследования помольного комплекса с сепаратором комбинированного действия ... 622 – 634

Севостьянов М. В., Осокин А. В. Аналитические исследования процесса формования вязко-пластичного материала в фильерах плоскоматричного гранулятора ..... 098 – 107

Стекольников Ю. А., Стекольникова Н. Ю., Емцев В. В., Санников Э. М. Обоснование процессов электроосаждения железо-никель-фосфорных сплавов..... 289 – 295

Таршис М. Ю., Черпицкий С. Н., Королев Л. В., Капранова А. Б. Экспериментальные исследования барабанно-лопастного смесителя сыпучих материалов..... 589 – 594

Туголуков Е. Н., Алексеев С. Ю., Дьячкова Т. П., Буракова Е. А., Езздеддин Б. Энергосбережение в системах вентиляции помещений ..... 108 – 115

Хмелёв В. Н., Шалунов А. В., Нестеров В. А., Боченков А. С. Повышение эффективности процесса мокрой газоочистки в трубе Вентури наложением ультразвуковых полей ..... 580 – 588

Математика. Физика

Нахман А. Д. Некасательная сходимость средних сопряженных рядов Фурье..... 644 – 659

Нахман А. Д. Суммирование двойных рядов Фурье полунепрерывными методами ..... 475 – 485

Фомин В. И. Об интерполяции решений линейных дифференциальных уравнений в случае кратных комплексных корней характеристического многочлена ..... 304 – 319

Машиностроение. Металлообработка

Ванин В. А., Колодин А. Н., Родина А. А., Фидаров В. Х. Построение формообразующих цепей станков со сложными движениями формообразования на основе гидравлических синхронных связей..... 123 – 135

Жумагалиева Г. Б., Осипов А. А., Першин В. Ф. Влияние режимных и геометрических параметров на кинетику процесса жидкофазной сдвиговой эксфолиации графита в стержневой барабанной мельнице..... 320 – 328

Хуррамов Ш. Р., Халтураев Ф. С., Курбанова Ф. З., Мусиров М. У. К решению некоторых контактных задач двухвалковых модулей ..... 486 – 499

Sevostyanov V. S., Uralsky V. I., Boychuk I. P., Ermilov R. A. Theoretical and Experimental Studies of the Grinding Facility with a Combined Separator

Sevostyanov M. V., Osokin A. V. Analytical Studies of the Process of Molding a Viscous-Plastic Material in the Spinnerets of a Flat-Matrix Granulator

Stekolnikov Yu. A., Stekolnikova N. Yu., Yemtsev V. V., Sannikov E. M. Rationale for Electrodeposition Iron-Nickel-Phosphorus Alloys

Tarshis M. Yu., Cherpitsky S. N., Korolev L. V., Kapranova A. B. Experimental Studies of a Drum-Paddle Mixer of Bulk Materials

Tugolukov E. N., Alekseev S. Yu., Dyachkova T. P., Burakova E. A., Ezzeddin B. Energy Saving in Ventilation Systems of Rooms

Khmelev V. N., Shalunov A. V., Nesterov V. A., Bochenkov A. S. Improving the Efficiency of the Wet Gas Cleaning Process in a Venturi Tube by Superposition of Ultrasonic Fields

Mathematics. Physics

Nakhman A. D. Non-Tangent Convergence of Middle Conjugate Fourier Series

Nakhman A. D. Summation of Double Fourier Series by Semicontinuous Methods

Fomin V. I. Interpolation of Solutions of Linear Differential Equations in the Case of Multiple Complex Roots of the Characteristic Polynomial

Mechanical Engineering. Metal Treatment

Vanin V. A., Kolodin A. N., Rodina A. A., Fidarov V. Kh. Construction of Forming Chains of Machine Tools with Complex Forming Movements Based on Hydraulic Synchronous Connections

Zhumagaliyeva G. B., Osipov A. A., Pershin V. F. The Effect of Mode and Geometric Parameters on Kinetics of Liquid Phase Shift Exfoliation Process Graphite at Rod Mill

Khurramov Sh. R., Khalturaev F. S., Kurbanova F. Z., Musirov M. U. Solving Some Contact Problems of Two-Roll Modules

Материаловедение. Нанотехнологии

Баршутин С. Н., Мешкова Э. А. Воздействие термоэлектронной эмиссии углеродных частиц на степень ионизации пламени ..... 155 – 160

Буренина А. И., Королев А. П., Макарчук М. В. Циклический отжиг высокоуглеродистой стали в среде углерода ..... 329 – 333

Дутов М. Н. Контроль и исследование технологического процесса формирования углеродных нанообъектов на электродах топливных элементов..... 512 – 518

Ерофеев А. В., Горохов Т. И., Данилов В. М. Влияние схемы старения цикличным замораживанием-оттаиванием пеноплекса на твердость по Бринеллю..... 334 – 340

Королев А. П., Верченов В. С., Никитин А. В., Мордасов М. Д. Поверхностная коррозия в хромистых сталях 14Х17Н2 и 03Х15Н4АМ3-Ш после электроэрозионной обработки..... 507 – 511

Мордасов Д. М., Макеев П. В., Полушкин Д. Л., Мордасов М. Д. Исследование структуры полимерного композиционного материала на основе смолы ЭД-20 и нанодисперсии сополимера стирола и акриловой кислоты ... 136 – 141

Наимов У. Р., Хамрокулов Р. Б., Султонов Н., Акобирова А. Т. Исследование структуры пленок CdTe, полученных вакуумным напылением в квазизамкнутом объеме..... 500 – 506

Новикова Н. О., Ярцев В. П. Древесно-наполненный композит на основе эпоксидной смолы..... 142 – 148

Ткачев А. Г., Слдозьян Р. Д. А., Михалева З. А., Толчков Ю. Н. Оценка влияния модификатора на основе углеродных нанотрубок с сурфактантами на физико-механические характеристики строительных композитов ..... 660 – 670

Толчков Ю. Н., Михалева З. А., Ткачев А. Г. Модифицирование композитов строительного назначения углеродными наноструктурами ..... 161 – 172

Туголуков Е. Н., Аль-Шариф А. Дж., Дьячкова Т. П., Буракова Е. А. Исследование теплопроводности наномодифицированных жидкостей ..... 671 – 677

Филатов И. С., Армянинов И. С., Маматказин Т. Р. Влияние параметров ультразвуковой сварки на прочность контактных соединений выводов интегральных микросхем ..... 149 – 154

Material Science. Nanotechnology

Barshutin S. N., Meshkova E. A. Investigation of the Effect of Thermionic Emission of Electrons on the Degree of Flame Ionization

Burenina A. I., Korolev A. P., Makarchuk M. V. Cyclic Annealing of High Carbon Steel in Carbon Environment

Dutov M. N. Monitoring and Investigating the Process of Forming Carbon Nanoobjects on Fuel Cell Electrodes

Erofeev A. V., Gorokhov T. I., Danilov V. M. The Impact of Aging Patterns of Cyclic Freezing-Thawing on Brinell Hardness of Penoplex

Korolev A. P., Verchenov V. S., Nikitin A. V., Mordasov M. D. Surface Corrosion in Chromium Steels 14X17N2 and 03X15N4AM3-SH after Electrical Discharge Machining

Mordasov D. M., Makeev P. V., Polushkin D. L., Mordasov M. D. A Study of the Structure of the Polymer Composite Material Based on ED-20 Resin and Copolymer Nanodispersion of Styrene and Acrylic Acid

Naimov U. R., Khamrokulov R. B., Sultonov N., Akobirova A. T. Examination of the Structure of CdTe Films Obtained by Vacuum Spraying in a Quasiclosed Volume

Novikova N. O., Yartsev V. P. Wood-Filled Epoxy Resin Composite

Tkachev A. G., Sldozyan R. D. A., Mikhaleva Z. A., Tolchkov Yu. N. Assessment of the Effect of a Modifier Based on Carbon Nanotubes with Surfactants on the Physicomechanical Characteristics of Building Composites

Tolchkov Yu. N., Mikhaleva Z. A., Tkachev A. G. Modifying Building Composites with Carbon Nanostructures

Tugolukov E. N., Al-Sharif A. J., Dyachkova T. P., Burakova E. A. Investigation of the Thermal Conductivity of Nanomodified Liquids

Filatov I. S., Armyaninov I. S., Mamatkazin T. R. The Effect of Ultrasonic Welding Parameters on the Strength of Contact Joints of Integrated Circuit Pins

Ягубов В. С., Щегольков А. В. Влияние различных типов углеродных нанотрубок и их концентраций на электрофизические параметры электронагревателей с саморегулированием температуры ..... 678 – 689

Yagubov V. S., Schegolkov A. V. The Effect of Various Types and Concentrations of Carbon Nanotubes on the Electrophysical Parameters of Electric Heaters with Self-Regulated Temperature

Информация

Information

Рецензия на справочник «Основы конструирования и расчета химико-технологического и природоохранного оборудования» (*М. А. Промтов*)..... 519

Review of the Reference Book “Bases of Design and Calculation of Chemical-Technological and Environmental Equipment” (*M. A. Promtov*)

Наши новые профессора, доктора и кандидаты наук

New Professors, Doctors and Candidates of Sciences

Абед Ахмед Хассан Абед ..... 174 .....**Abed Akhmed Khassan Abed**
Борисова Е. М. ..... 174 .....**Borisova E. M.**
Ведищев С. М. ..... 690 .....**Vedishchev S. M.**
Ветлугин Н. А. ..... 691 .....**Vetlugin N. A.**
Власова Т. А. ..... 174 .....**Vlasova T. A.**
Григорьева В. С. ..... 520 .....**Grigoryeva V. S.**
Гуськов А. А. ..... 691 .....**Guskov A. A.**
Климов Д. В. ..... 343 .....**Klimov D. V.**
Корнаев А. В. ..... 341 .....**Kornaev A. V.**
Костякова А. А. ..... 691 .....**Kostyakova A. A.**
Кошкарова А. Г. ..... 343 .....**Koshkarova A. G.**
Мокрозуб В. Г. ..... 173 .....**Mokrozub V. G.**
Слезин К. А. ..... 343 .....**Slezin K. A.**
Снятков А. Н. ..... 344 .....**Snyatkov A. N.**
Туев М. А. ..... 344 .....**Tuev M. A.**
Хромченко О. Н. ..... 342 .....**Khromchenko O. N.**

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

AUTHOR INDEX

А		**A**
Абоносимов О. А.	442 – 452	**Abonosimov O. A.**
Авцинов И. А.	063 – 071, 526 – 534	**Avtsinov I. A.**
Акобирова А. Т.	500 – 506	**Akobirova A. T.**
Алгазин Е. И.	250 – 255, 437 – 441	**Algazin E. I.**
Алексеев С. Ю.	108 – 115, 350 – 359	**Alekseev S. Yu.**
Алексеева Н. В.	282 – 288	**Alekseeva N. V.**
Алехин П. А.	022 – 035	**Alekhin P. A.**
Аль-Бусаиди С. С. С.	072 – 085	**Al-Busaidi S. S. S.**
Аль-Шариф А. Дж.	671 – 677	**Al-Sharif A. J.**
Армянинов И. С.	149 – 154	**Armyaninov I. S.**
Аррусси А.	256 – 270	**Arroussi A.**
Аррусси М.	256 – 270	**Arroussi M.**
Артемов А. А.	374 – 380	**Artemov A. A.**
Артемова С. В.	374 – 380	**Artemova S. V.**
Б		**B**
Бакунин Е. С.	116 – 122	**Bakunin E. S.**
Балобаева Н. Н.	453 – 460	**Balobaeva N. N.**
Баранов Д. М.	271 – 281	**Baranov D. M.**
Баршутин С. Н.	155 – 160	**Barshutin S. N.**
Бахаева Д. Д.	092 – 097	**Bakhaeva D. D.**
Башкатова А. В.	053 – 062, 206 – 218	**Bashkatova A. V.**
Бернацкий П. Н.	612 – 621	**Bernatsky P. N.**
Битюков В. К.	526 – 534	**Bityukov V. K.**
Бойчук И. П.	622 – 634	**Boychuk I. P.**
Боченков А. С.	580 – 588	**Bochenkov A. S.**
Брянкин К. В.	453 – 460, 603 – 611	**Bryankin K. V.**
Будникова О. А.	461 – 474	**Budnikova O. A.**
Буракова Е. А.	108 – 115, 671 – 677	**Burakova E. A.**
Буренина А. И.	329 – 333	**Burenina A. I.**
В		**V**
Ванин В. А.	123 – 135	**Vanin V. A.**
Верлока И. И.	092 – 097	**Verloka I. I.**
Верченов В. С.	507 – 511	**Verchenov V. S.**
Г		**G**
Гатчин Ю. А.	535 – 546	**Gatchin Yu. A.**
Глебов А. О.	022 – 035	**Glebov A. O.**
Глистин В. Н.	190 – 196	**Glistin V. N.**
Голованчиков А. Б.	271 – 281	**Golovanchikov A. B.**
Гончаренко В. И.	381 – 394	**Goncharenko V. I.**
Горбунов А. В.	241 – 249	**Gorbunov A. V.**
Горохов Т. И.	334 – 340	**Gorokhov T. I.**
Д		**D**
Данилов В. М.	334 – 340	**Danilov V. M.**
Данилов С. Н.	047 – 052	**Danilov S. N.**
Дегтярев А. А.	116 – 122, 296 – 303, 453 – 460	**Degtyarev A. A.**

Дедов Д. Л.	412 – 422	**Dedov D. L.**
Дмитриевский Б. С.	053 – 062, 206 – 218	**Dmitrievsky B. S.**
Долгунин В. Н.	595 – 602	**Dolgunin V. N.**
Дуран Дельгадо О. А.	635 – 643	**Duran Delgado O. A.**
Дутов М. Н.	512 – 518	**Dutov M. N.**
Дьячкова Т. П.	108 – 115, 671 – 677	**Dyachkova T. P.**
Е		**E**
Егоров В. С.	241 – 249	**Egorov V. S.**
Езздин Б.	108 – 115	**Ezzeddin B.**
Емельянов А. Е.	063 – 071	**Emelyanov A. E.**
Емцев В. В.	289 – 295	**Yemtsev V. V.**
Ермилов Р. А.	622 – 634	**Ermilov R. A.**
Ерофеев А. В.	334 – 340	**Erofeev A. V.**
Ефремов Н. Ф.	461 – 474	**Efremov N. F.**
Ж		**Zh**
Жумагалиева Г. Б.	320 – 328	**Zhumagaliyeva G. B.**
З		**Z**
Зарапина И. В.	442 – 452	**Zarapina I. V.**
Захаров А. Ю.	412 – 422	**Zakharov A. Yu.**
Зацепин Е. П.	560 – 566	**Zatsepin E. P.**
Зацепина В. И.	560 – 566	**Zatsepina V. I.**
Зырянов Ю. Т.	197 – 205	**Zyryanov Yu. T.**
И		**I**
Иванов А. В.	395 – 405	**Ivanov A. V.**
Иванова М. А.	461 – 474	**Ivanova M. A.**
Ивлиев М. Н.	063 – 071	**Ivliev M. N.**
Игнатов Н. Н.	442 – 452	**Ignatov N. N.**
Ильичева М. Н.	547 – 559	**Ilyicheva M. N.**
К		**K**
Каменская М. А.	180 – 189, 374 – 380	**Kamenskaya M. A.**
Канаичева А. В.	461 – 474	**Kanaicheva A. V.**
Капранова А. Б.	092 – 097, 589 – 594	**Kapranova A. B.**
Карпов С. В.	022 – 035	**Karpov S. V.**
Карпушкин С. В.	022 – 035, 360 – 373	**Karpushkin S. V.**
Катаева Л. Ю.	547 – 559	**Kataeva L. Yu.**
Ковалев С. В.	612 – 621	**Kovalev S. V.**
Колодин А. Н.	123 – 135	**Kolodin A. N.**
Коновалов Д. Н.	612 – 621	**Konovalov D. N.**
Корнилов К. С.	360 – 373	**Kornilov K. S.**
Коробова И. Л.	219 – 224, 423 – 430	**Korobova I. L.**
Королев А. П.	329 – 333, 507 – 511	**Korolev A. P.**
Королев Л. В.	589 – 594	**Korolev L. V.**
Котенев С. И.	442 – 452	**Kotenev S. I.**
Кочергин С. В.	431 – 436	**Kochergin S. V.**
Краснянский М. Н.	350 – 359	**Krasnyansky M. N.**
Куликов А. Я.	282 – 288	**Kulikov A. Ya.**
Курбанова Ф. З.	486 – 499	**Kurbanova F. Z.**
Курносов Р. Ю.	180 – 189	**Kurnosov R. Yu.**

Л		**L**
Лазарев С. И.	442 – 452, 612 – 621	**Lazarev S. I.**
Лаухин И. Р.	423 – 430	**Laukhin I. R.**
Лебедев Г. Н.	381 – 394	**Lebedev G. N.**
Леонтьева А. И.	603 – 611	**Leontieva A. I.**
Литницкий В. Ю.	282 – 288	**Litnitsky V. Yu.**
Лощилов А. А.	547 – 559	**Loshchilov A. A.**
Луа П.	612 – 621	**Lua P.**
М		**M**
Майстренко Н. В.	219 – 224, 423 – 430	**Maistrenko N. V.**
Макарчук М. В.	329 – 333	**Makarchuk M. V.**
Макеев П. В.	136 – 141	**Makeev P. V.**
Малыгин Е. Н.	350 – 359	**Malygin E. N.**
Маматказин Т. Р.	149 – 154	**Mamatkazin T. R.**
Мамонтов А. А.	053 – 062, 206 – 218	**Mamontov A. A.**
Масленников Д. А.	547 – 559	**Maslennikov D. A.**
Матвейкин В. Г.	053 – 062, 206 – 218	**Matveykin V. G.**
Менсах Ж.	256 – 270	**Mensah J.**
Меренцов Н. А.	271 – 281	**Merentsov N. A.**
Мешкова Э. А.	155 – 160	**Meshkova E. A.**
Михайлин Д. А.	381 – 394	**Mikhaylin D. A.**
Михалева З. А.	161 – 172, 660 – 670	**Mikhaleva Z. A.**
Мищенко Е. С.	072 – 085	**Mishchenko E. S.**
Мищенко С. В.	072 – 085	**Mishchenko S. V.**
Мозгова Г. В.	406 – 411	**Mozgova G. V.**
Мокрозуб В. Г.	360 – 373	**Mokrozub V. G.**
Мордасов Д. М.	136 – 141	**Mordasov D. M.**
Мордасов М. Д.	406 – 411, 136 – 141, 507 – 511	**Mordasov M. D.**
Мордасов М. М.	406 – 411	**Mordasov M. M.**
Москвитин С. П.	395 – 405	**Moskvitin S. P.**
Мусиров М. У.	486 – 499	**Musirov M. U**
Н		**N**
Наимов У. Р.	236 – 240, 500 – 506	**Naimov U. R.**
Наумова А. Ю.	197 – 205	**Naumova A. Yu.**
Нахман А. Д.	475 – 485, 644 – 659	**Nakhman A. D.**
Неизвестный О. Г.	006 – 021	**Neizvestnyy O. G.**
Немтинов В. А.	567 – 579	**Nemtinov V. A.**
Немтинова Ю. В.	567 – 579	**Nemtinova Yu. V.**
Непрокин А. В.	241 – 249	**Neprokin A. V.**
Нестеров В. А.	580 – 588	**Nesterov V. A.**
Никитин А. В.	507 – 511	**Nikitin A. V.**
Новикова Н. О.	142 – 148	**Novikova N. O.**
О		**O**
Образцова Е. Ю.	116 – 122	**Obraztsova E. Yu.**
Обухов А. Д.	412 – 422	**Obukhov A. D.**

Осипов А. А.	320 – 328	**Osipov A. A.**
Осокин А. В.	098 – 107	**Osokin A. V.**
П		**P**
Панасюк Ю. Н.	047 – 052, 190 – 196	**Panasyuk Yu. N.**
Першин В. Ф.	320 – 328	**Pershin V. F.**
Печагин Е. А.	431 – 436	**Pechagin E. A.**
Подвальный С. Л.	006 – 021	**Podvalnyy S. L.**
Полушкин Д. Л.	136 – 141	**Polushkin D. L.**
Пономарев С. В.	072 – 085	**Ponomarev S. V.**
Попов А. П.	006 – 021	**Popov A. P.**
Промтов М. А.	086 – 091, 519	**Promtov M. A.**
Пронин В. А.	595 – 602	**Pronin V. A.**
Прохоренко Н. А.	271 – 281	**Prokhorenko N. A.**
Прохоренков В. Д.	612 – 621	**Prokhorenkov V. D.**
Пудовкин А. П.	047 – 052	**Pudovkin A. P.**
Р		**R**
Рогачёв А. И.	047 – 052	**Rogachev A. I.**
Родина А. А.	123 – 135, 567 – 579	**Rodina A. A.**
Рудакова А. Б.	603 – 611	**Rudakova A. B.**
Рухов Антон В.	296 – 303	**Rukhov A. V.**
Рухов Артём В.	116 – 122, 296 – 303, 453 – 460	**Rukhov A. V.**
Рязанов И. Г.	197 – 205	**Ryazanov I. G.**
С		**S**
Саиф М. Н. М.	053 – 062, 206 – 218	**Saif M. N. M.**
Санников Э. М.	289 – 295	**Sannikov E. M.**
Севостьянов В. С.	622 – 634	**Sevostyanov V. S.**
Севостьянов М. В.	098 – 107	**Sevostyanov M. V.**
Скибина Л. М.	635 – 643	**Skibina L. M.**
Скоморохов П. И.	560 – 566	**Skomorokhov P. I.**
Слдозьян Р. Д. А.	660 – 670	**Sldozyan R. D. A.**
Слепых А. В.	595 – 602	**Slepykh A. V.**
Смольская Д. О.	271 – 281	**Smolskaya D. O.**
Старун И. Г.	535 – 546	**Starun I. G.**
Стекольников Ю. А.	289 – 295	**Stekolnikov Yu. A.**
Стекольникова Н. Ю.	289 – 295	**Stekolnikova N. Yu.**
Степанов А. Ю.	086 – 091	**Stepanov A. Yu.**
Субочева М. Ю.	603 – 611	**Subocheva M. Yu.**
Султонов Н.	500 – 506	**Sultonov N.**
Сурков В. О.	395 – 405	**Surkov V. O.**
Сустин А. И.	047 – 052	**Sustin A. I.**
Суханова Н. В.	526 – 534	**Sukhanova N. V.**
Т		**T**
Таршис М. Ю.	589 – 594	**Tarshis M. Yu.**
Тимофеев А. М.	036 – 046	**Timofeev A. M.**
Тихомиров С. Г.	006 – 021	**Tikhomirov S. G.**
Ткачев А. Г.	161 – 172, 660 – 670	**Tkachev A. G.**
Толчков Ю. Н.	161 – 172, 660 – 670	**Tolchkov Yu. N.**
Тришина А. В.	296 – 303	**Trishina A. V.**
Туголуков Е. Н.	108 – 115, 241 – 249, 350 – 359, 671 – 677	**Tugolukov E. N.**

У		**U**
Уральский В. И.	622 – 634	**Uralsky V. I.**
Ф		**F**
Фидаров В. Х.	123 – 135	**Fidarov V. Kh.**
Филатов И. С.	149 – 154	**Filatov I. S.**
Фомин В. И.	304 – 319	**Fomin V. I.**
Фролов С. С.	225 – 235	**Frolov S. S.**
Х		**Kh**
Халтураев Ф. С.	486 – 499	**Khalturaev F. S.**
Хамрокулов Р. Б.	500 – 506	**Khamrokulov R. B.**
Хлебников В. А.	022 – 035	**Khlebnikov V. A.**
Хмелёв В. Н.	580 – 588	**Khmelev V. N.**
Хуррамов Ш. Р.	486 – 499	**Khurramov Sh. R.**
Ч		**Ch**
Чашкина Т. В.	219 – 224	**Chashkina T. V.**
Чернышов В. А.	431 – 436	**Chernyshov V. A.**
Чернышов Н. Г.	197 – 205, 374 – 380	**Chernyshov N. G.**
Чернышова Т. И.	180 – 189	**Chernyshova T. I.**
Черпицкий С. Н.	589 – 594	**Cherpitsky S. N.**
Ш		**Sh**
Шалунов А. В.	580 – 588	**Shalunov A. V.**
Щегольков А. В.	678 – 689	**Schegolkov A. V.**
Ю		**Yu**
Юганcон А. Н.	535 – 546	**Yuganson A. N.**
Я		**Ya**
Ягубов В. С.	678 – 689	**Yagubov V. S.**
Яковлев П. А.	092 – 097	**Yakovlev P. A.**
Ярцев В. П.	142 – 148	**Yartsev V. P.**

Правила оформления статей

Рукопись статьи должна быть подготовлена в редакторе Word для Windows'97 – 2007 и распечатана на принтере в 2-х экземплярах с приложением сопроводительного письма организации в одном экземпляре. Второй экземпляр рукописи должен быть подписан всеми авторами. К рукописи прилагается статья на электронном носителе (направляется по электронной почте на адрес главного редактора glredgnz@mail.tstu.ru).

Компьютерный вариант статьи оформляется в виде единого файла, включающего полный текст, формулы, список литературы, таблицы и при наличии – рисунки. Сопроводительные документы не включаются в файл. Файл именуется по фамилии первого автора.

Техническое оформление статей. Параметры страницы: верхнее поле 3 см, нижнее – 5,3 см, левое – 2 см; правое – 6,5 см, верхний колонтитул – 0 см, нижний – 4,3 см; шрифт текста статьи – Times New Roman 10 кегль через один интервал, подстрочные и надстрочные индексы, набранные не в математическом редакторе – 12 кегль. Абзацный отступ – 0,75 см. Ключевые фразы текста могут быть выделены курсивом. Использование жирного шрифта, подчеркивания, отличных от одинарного межстрочных интервалов, а также оформление отступов пробелами не допускаются. Номера страниц проставляются в центре нижнего колонтитула.

На первой странице статьи помещаются в указанном порядке – УДК, название статьи, инициалы и фамилии авторов, кафедра и организация, где работают все авторы (отдельной строкой для каждого автора), контактный электронный адрес (для переписки), ключевые слова и фразы, аннотация на русском и английском языках. Данная страница располагается в начале файла и не нумеруется. В конце статьи прилагается библиографический список используемой литературы на русском и английском языках.

Ключевые слова представляются в форме, принятой в ведущих журналах по данной отрасли науки в алфавитном порядке. Максимальное количество ключевых выражений 7 – 9, количество слов в каждом не более 3.

Обозначения для технических статей даются в начале статьи, за аннотацией перед основным текстом, в рамке в две колонки. В статье должны использоваться физические единицы и обозначения, принятые в Международной системе единиц СИ. Если обозначений меньше 7–8, то можно указывать их в тексте. Список обозначений составляется по алфавиту в следующем порядке: русские – написание прямое, латинские – написание курсивом, греческие – написание прямое, прочие символы и аббревиатуры.

Дублирование данных в тексте, таблицах, рисунках, а также использование в таблицах не обсуждаемых в тексте литературных данных, не допускаются.

Иллюстрации (рисунки, графики) должны быть расположены в тексте статьи и выполнены в одном из графических редакторов (формат tif, jpg), с соблюдением ГОСТ 2.304–81 ЕСКД «Шрифты чертежные». Допускается также создание и представление графиков при помощи табличных процессоров «Excel». Каждый рисунок должен иметь номер и подпись. Рисунки и фотографии должны иметь контрастное изображение (только в черно-белом изображении). Цветные рисунки не допускаются (за качество цветных рисунков редакция ответственности не несет). Формат рисунка должен быть не более 12 см по ширине и в виде, пригодном для непосредственного воспроизведения. Рисунки могут включать краткие цифровые или буквенные обозначения (нумерующиеся слева направо или по часовой стрелке), набранные соответствующим остальному тексту шрифтом. Желательно включать рисунки в состав файла (рисунки, выполненные в формате «Word», должны быть сгруппированы, толщина линий для данных рисунков не менее

0,75 pt). Под рамкой рисунка на расстоянии не менее 1 см располагается его номер и подрисуночная подпись. Включение данной страницы в состав файла обязательно. Использование рисунков должно диктоваться необходимостью более ясного понимания излагаемого материала.

Таблицы представляются по форме: слово «Таблица» в правом верхнем углу, номер таблицы цифрами, название с большой буквы форматируется по центру страницы. Содержимое ячеек следует располагать по центру. Если таблица занимает более одной страницы, ниже шапки таблицы на первой странице располагается строка нумерации колонок – по порядку слева направо, вторая и последующая страницы начинаются словами «Продолжение таблицы», далее повторяется строка нумерации. Таблицы размером менее одной страницы разрывать не следует. Размеры ячеек и таблицы в целом следует по возможности минимизировать.

В таблицы включаются только необходимые цифровые данные. Материал должен быть метрологически обработан (указаны число измерений, погрешность и т.п.). В тексте на полях отмечаются места расположения таблиц.

Математические формулы должны быть написаны четко. Формулы и буквенные обозначения величин должны быть набраны в редакторе формул **Microsoft Equation 3.0**.

Формулы в распечатках должны быть тщательно выверены автором, который несет за них полную ответственность.

Редакция не накладывает ограничений на количество и сложность формул.

Шрифт в стиле основного текста Times New Roman; переменные – курсив, греческие – прямо, матрица-вектор – полужирный; русские – прямо.

Размеры в математическом редакторе (в порядке очередности): обычный – 10 pt; крупный индекс – 8 pt; мелкий индекс – 7 pt; крупный символ – 16 pt; мелкий символ – 10 pt.

Цитируемая литература нумеруется в порядке упоминания, в тексте порядковый номер ссылки заключается в квадратные скобки. Список используемой литературы помещается в конце статьи и оформляется с абзаца в соответствии с **ГОСТ Р 7.0.100.2018.**

Нумерация и включение в список всех упомянутых в статье литературных источников обязательны. Ссылки на статьи, находящиеся в печати, не допускаются.

Образец оформления списка литературы

на русском языке:

Патент

Пат. 2173791 Российская Федерация, МПК F 03D3/06. Ветровая энергетическая установка / В. Р. Милошевич, Р. М. Карапетян, М. И. Конюхов, Г. А. Петров; заявитель и патентообладатель Тамб. воен. авиац. инженер. ин-т. – № 99120251/06 ; заявл. 23.09.1999 ; опубл. 20.09.2001, Бюл. № 26. – 3 с.

Статья из журнала

Вигдорович, В.И. Наличие и вклад водородно-абсорбционной деполяризации при коррозии стали в растворах / В. И. Вигдорович, С. Е. Синютина, Е. А. Шитикова // Вестн. Удмурт. ун-та. – 2008. – № 8. – с. 3–12.

Книги одного, двух или трех авторов

Чиликин, М. Г. Общий курс электропривода / М. Г. Чиликин, А.С. Сандлер. – М. : Энергоатомиздат, 1981. – 576 с.

Книги более четырех авторов

Быстродействующие электроприводы с широтно-импульсными преобразователями / М. Е. Гольц, И. И. Иванов, П. П. Петров [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 184 с.

Диссертация

Мордасов, Д. М. Пневмодинамические методы и устройства контроля плотности жидкостей и сыпучих материалов : дис. ... д-ра техн. наук : 05.11.13 / Мордасов Денис Михайлович. – Тамбов, 2006. – 257 с.

Статья из сборника

Пучков, Н. П. Олимпиадная среда как фактор обеспечения качества подготовки специалистов / Н. П. Пучков, А. И. Попов // Высокие интеллектуальные технологии и инновации в образовании и науке : материалы XV Междунар. науч.-метод. конф., 15–16 февраля 2008 г., СПб. – СПб., 2008. – С. 125–126.

Электронный ресурс

Иванова, А. Е. Проблемы смертности в регионах Центрального федерального округа. – Текст электронный / А. Е. Иванова // Социальные аспекты здоровья населения. – 2018. – № 2. – URL : http://vestnik.mednet.ru/content/ view/54/30/ (дата обращения: 19.09.2018).

перевод русской литературы на английский язык с соблюдением правил транслитерации:

Miloshevich V.R., Karapetyan R.M., Konyuhov M.I., Petrov G.A. *Vetrovaya energeticheskaya ustanovka* [Wind-Driven Electric Plant]., Russian Federation, 2001, Pat. 2173791.

Vigdorovich V.I., Siniutina S.E., Shitikova E.A. [The presence and contribution of hydrogen absorption depolarization during corrosion of steel in solutions], *Vestnik Udmurtskogo universiteta* [Bulletin of Udmurt University], 2008, no. 8, pp. 3-12.

Chilikin M.G., Sandler A.S. *Obshchiy kurs elektroprivoda* [General course of electric drive], Moscow: Energoatomizdat, 1981, 576 p.

Gol'ts M.Ye., Ivanov I.I., Petrov P.P., Popov A.A., Sidorov V.V. *Bystrodeystvuyushchiye elektroprivody s shirotno-impul'snymi preobrazovatelyami* [High Speed Pulse-Width Converters], Moscow: Energoatomizdat, 1986, 184 p.

Mordasov D.M. *PhD Dissertation* (*Technical*), Tambov, 2006, 257 p.

Puchkov N.P., Popov A.I. *Vysokiye intellektual'nyye tekh-nologii i innovatsii v obrazovanii i nauke: materialy XV Mezhdunarodnoy nauchno-metodicheskoy konferentsii* [High Intellectual Technologies and Innovations in Education and Science: Materials of the XV International Scientific and Methodological Conference], 15-16 February, 2008, St. Petersburg, 2008, pp. 125-126.

http://vestnik.mednet.ru/content/ view/54/30/ (accessed 19 September 2018).

Авторы несут ответственность за правильность изложения материала и использования специальных терминов.

В конце статьи указывают фамилию, имя, отчество (полностью) автора, с которым редакция будет решать вопросы, возникающие при работе с текстом, его адрес, телефоны, факс, e-mail.

На отдельной странице необходимо указать сведения обо всех авторах: ФИО (полностью), ученая степень, ученое звание, место работы (полностью), должность, контактные телефоны, e-mail. Сведения об авторах также повторяются на английском языке.

Для публикации и своевременной подготовки журнала необходимо заполнить регистрационную карту участника, представляемую на отдельном бумажном носителе и в электронном виде.