



ТЕПЛОФИЗИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

**ДВЕНАДЦАТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКАЯ ШКОЛА**

**Тамбов
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
2022**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Российская Академия наук
Национальный комитет по теплофизическим свойствам веществ РАН
Объединенный институт высоких температур РАН
Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова
Московский институт электроники и математики им. А. Н. Тихонова
НИУ «Высшая школа экономики»
Тамбовский государственный технический университет

ТЕПЛОФИЗИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

ДВЕНАДЦАТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКАЯ ШКОЛА

Тамбов, 19 – 21 октября 2021 г.

Сборник научных статей

Научное электронное издание



Тамбов

◆ Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ» ◆

2022

УДК 536.2.08.001.76

ББК з311

Т31

Т31 **Теплофизика** и информационные технологии [Электронный ресурс] : сборник научных статей. Тамбов, 19 – 21 октября 2021 г. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2022. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Системные требования : ПК не ниже класса Pentium II ; CD-ROM-дисковод ; 00,0 Mb ; RAM ; Windows 95/98/XP ; мышь. – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-8265-2452-7.

Включены статьи по тематике «Теплофизика и информационные технологии».

Предназначен для научных работников, преподавателей, аспирантов и студентов.

УДК 536.2.08.001.76

ББК з311

Материалы статей предоставлены в электронном виде и сохраняют авторскую редакцию.

*Все права на размножение и распространение в любой форме остаются за разработчиком.
Незаконное копирование и использование данного продукта запрещено.*

ISBN 978-5-8265-1959-2 (общ.)
ISBN 978-5-8265-2452-7

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»), 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ	9
<i>Мищенко С.В., Пономарев С.В.</i>	
Всесоюзные и международные теплофизические школы.....	9
<i>Бернардо Буономо, Анна Ди Паска, Оронцио Манка, Сергио Нанно, Сергио Нардини</i>	
Анализ масштаба пор теплового и гидродинамического поведения в открытых металлических пенах с наножидкостями.....	17
<i>Сафаров М.М.</i>	
Развитие теплофизической школы и теплофизических исследований в Таджикистане.....	19
<i>Пономарев С.В.</i>	
К вопросу о получении целевой функции и решении задач оптимизации методов и устройств для измерения теплофизических свойств веществ.....	25
<i>Ахтямов Э.Р., Горбатов В.И., Ивлиев А.Д., Полев В.Ф., Куриченко А.А.</i>	
Температуропроводность и удельное электрическое сопротивление твердых растворов системы никель-ванадий в интервале температур 300-1500 К.....	30
СЕКЦИЯ 1. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА	38
<i>Ряжских А.В.</i>	
Массоперенос в осесимметричной шарообразной бидисперсной области с идеальным контактом при заданной концентрации на внешней границе.....	38
<i>Ряжских В.И., Хвостов А.А., Журавлев А.А., Ряжских А.В.</i>	
Оценка погрешности расчета интегральных характеристик течения структурированных жидкообразных сред в цилиндрическом канале.....	43
<i>Печенегов Ю.Я., Косов В.А.</i>	
Компактный многопоточный трубчатый змеевик для теплопередающих установок.....	49
<i>Печенегов Ю.Я., Кузьмина Р.И., Бурухина О.В.</i>	
Методика расчета основных теплогидравлических характеристик твердотопливной каталитической печи длительного горения.....	54
<i>Печенегов Ю.Я.</i>	
Энергоэффективное обезвоживание осадочного ила сточных вод в среде перегретого пара испаряемой жидкости.....	60
<i>Ойматова Х.Х., Сафаров Ш.Р., Зарипова М.А., Сафаров М.М.</i>	
Определение коэффициента набухания тернарных систем в процессе увлажнения паров воды.....	66

<i>Давлатшоев С.К., Сафаров М.М.</i>	
Кондуктометрический метод контроля гидрогеохимического режима водорастворимого основания плотины.....	72
<i>Сафаров М.М., Абдуллоев М.А., Гуломов М.М., Зоиров Х.А., Сафаров П.М.</i>	
Процесс седиментация и определение размеров наночастиц.....	78
<i>Сафаров М.М., Умар У.Ш., Неъматов Г.Н., Умарализода Мансури Умарали</i>	
Теплофизические свойства сплавов с эффектами памяти “форм” на основе ванадия.....	84
<i>Хина Б.Б.</i>	
Применение CALPHAD-подхода для расчета адиабатической температуры СВС в системе Ni-Al.....	91
<i>Abzar Mirzaliyev, Javid Safarov, Dirk Tuma, Rasim Bashirov</i>	
Density and speed of sound of north Atlantic seawater.....	96
<i>Сафаров М.М., Кутосби Мирзоева, Матлаби Джабборзода, Собиров Д.Ф.</i>	
Теплопроводность толуола с учетом влияния наночастиц с эффектами памяти “форм” на линии насыщения.....	98
<i>Рудобаишта С.П.</i>	
Исследование массопроводных свойств высушиваемых материалов.....	107
<i>Гутовский А.В., Латышенко К.П., Усович А.В.</i>	
Защита людей от опасных факторов лесного пожара при отсутствии возможности эвакуации в безопасное место.....	114
<i>Майникова Н.Ф., Rogov И.В., Никулин С.С.</i>	
О законе движения границы фазового перехода.....	120
<i>Завражнов А.И., Балашов А.В., Толстошеин С.С., Кольцов С.М.</i>	
Совершенствование методики расчета потерь свекломассы при хранении в кагатах.....	125
<i>Жиркова А.А., Дивин А.Г.</i>	
Тепловой контроль растительных тканей овощей и фруктов.....	131
<i>Власов В.В.</i>	
Исследование вольтерровых интегро-дифференциальных уравнений, возникающих в теплофизике и теории вязкоупругости.....	136
СЕКЦИЯ 2. НОВЫЕ МЕТОДЫ И ИНФОРМАЦИОННО-СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИЗМЕРЕНИЙ.....	145
<i>Селиванова З.М., Скоморохов К.В.</i>	
Определение теплофизических свойств твердых материалов в условиях неопределенности измерений.....	145

<i>Абдужалилзода Фарзона, Тиллоева Т.Р., Сафаров М.М.</i>	
Энергетическая установка для получения электрического тока и тепла.....	150
<i>Давлатшоев С.К., Сафаров М.М.</i>	
Термометр - тепломер для определения пути сосредоточенной фильтрации в основании плотины.....	161
<i>Сафаров М.М., Джумаев С.С., Гуломов М.М., Тиллоева Т.Р., Умарализода Мансури Умарали</i>	
Влияние (Осунт, Мсунт) на изменение теплоемкости изобутана при различных температурах и давлениях.....	165
<i>Ойматова Х.Х., Сафаров Ш.Р., Зарипова М.А., Сафаров М.М.</i>	
Экспериментальное определение коэффициентов адсорбции и массопередачи тернарных систем до и после нагрева.....	172
<i>Зарипов Д.А., Зикилов Ш.Т., Давлатов Р.Д.</i>	
Исследование коэффициента адсорбции и массопереноса известняка Яванского месторождения (Чаманзор) Республики Таджикистан.....	184
<i>Балашов А.А.</i>	
Исследование метода обработки полезного сигнала при тепловом контроле структурных переходов в полимерах.....	192
<i>Громов Ю.Ю., Зенкин А.А., Родионов В.В., Григорян А.С.</i>	
Экспериментальная апробация дистанционной оценки теплофизических параметров материалов в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн с применением нейронных сетей.....	197
<i>Ищук И.Н., Зенкин А.А., Родионов В.В., Садчиков В.С.</i>	
Анализ изменения радиационных и термодинамических температур материалов в течение суток для выбора рационального интервала дистанционной оценки теплофизических параметров.....	204
<i>Aytakin Guluzade, Javid Safarov</i>	
Density of 1-butyl-3-methylimidazolium trifluoromethanesulfonate and methanol binary mixtures.....	211
<i>Норов З.Ю., Тиллоева Т.Р., Сафаров М.М.</i>	
Влияние термического нанопорошка на изменение удельного сопротивления и электропроводности воды при высоких параметрах состояния.....	217
<i>Давлатов Н.Б., Алтунин В.А., Гортышов Ю.Ф., Зарипова М.А., Сафаров М.М.</i>	
Применение способа проф. Алтунина В.А. и др. для определения вклада наночастиц на изменение теплофизических характеристик углеводородов.....	228

<i>Сафаров М.М., Раджабова С.С., Тиллоева Т.Р., Зарипова М.А.</i>	
Влияние кремниевых фуллеренов на изменение термодинамических характеристик электролитов NaCl в зависимости от температуры при атмосферном давлении.....	236
<i>Удалова А.П., Чернышов В.Н.</i>	
Метод неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов и изделий с использованием СВЧ-нагрева и его метрологический анализ.....	245
<i>Удалова А.П., Чернышов А.В.</i>	
Неразрушающий микроволновый метод контроля теплофизических характеристик многослойных конструкций с метрологическим анализом.....	249
<i>Холиков М.М., Сафаров М.М.</i>	
Теплофизические свойства пористой гранулированной оксиды алюминия с наполнениями платины, в зависимости от температуры в воздухе.....	254
<i>Карасев П.И., Карамышева Е.О., Катруш А.С.</i>	
К вопросу о синтезе сложных систем управления теплофизическими процессами.....	263
<i>Казьмин А.И.</i>	
Методы поверхностных электромагнитных волн для контроля электрофизических параметров материалов и покрытий со сложной внутренней структурой.....	267
<i>Казьмин А.И., Федюнин Д.П., Федюнин П.А.</i>	
Контроль электрофизических параметров анизотропных диэлектрических покрытий многочастотным оптимизационным методом поверхностных электромагнитных волн.....	272
<i>Рязанов И.В., Балабанов П.В., Сенкевич С.А.</i>	
Система теплового контроля работоспособности изолирующего дыхательного аппарата.....	277
<i>Титов М.Ю., Карасев П.И., Карамышева Е.О.</i>	
Подход проектирования систем управления теплофизическими процессами.....	282
<i>Громов Ю.Ю., Самойлов В.Д., Семисчастнов А.Е., Мерочкин А.С., Клонин И.П.</i>	
Алгоритмы фильтрации изображений в инфракрасном диапазоне для мехатронных систем.....	287
<i>Шатских В.В., Самойлов В.Д., Мерочкин А.С., Семисчастнов А.Е., Клонин И.П.</i>	
Алгоритм формирования панорамного изображения в инфракрасном диапазоне.....	292
<i>Самойлов В.Д., Верещагин Д.Ю., Клонин И.П., Мерочкин А.С., Семисчастнов А.Е.</i>	
Определение характерных областей для объектов на изображениях в инфракрасном диапазоне.....	297

<i>Шатских В.В., Мерочкин А.С., Семисчастнов А.Е., Самойлов В.Д., Клонин И.П.</i>	
Методы сравнения спектров температурно-временных зависимостей.....	302
<i>Клонин И.П., Верещагин Д.Ю., Самойлов В.Д., Мерочкин А.С., Семисчастнов А.Е.</i>	
Применение генераторов хаотических колебаний для организаций воздействий на информационные каналы мехатронных систем.....	307
<i>Мерочкин А.С., Болдырев А.В., Семисчастнов А.Е., Самойлов В.Д., Клонин И.П.</i>	
Применение технологии адаптивной фильтрации в информационных каналах мехатронных систем.....	312
<i>Семисчастнов А.Е., Болдырев А.В., Мерочкин А.С., Самойлов В.Д., Клонин И.П.</i>	
Оценка безопасности информационных каналов при управлении мехатронными системами.....	317
<i>Лосев Г.Л., Колесниченко И.В., Мамыкин А.Д.</i>	
Определение формы кристаллической фазы при направленной кристаллизации ультразвуковым методом.....	322
<i>Романова М.А.</i>	
Исследование тепловых режимов светодиодных модулей.....	325
СЕКЦИЯ 3. МЕТРОЛОГИЯ, ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ, УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ, ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕПЛОФИЗИКИ.....	329
<i>Шабанов Д.Ю., Мирошников А.И.</i>	
Управление качеством поставщиков на заводе-производителе тянутой металлической проволоки.....	329
<i>Блюмин С.Л., Плотников А.В., Григорьев А.С.</i>	
Моделирование эллиптической области неопределенности измерения комплексной величины.....	334
<i>Майникова Н.Ф., Rogov И.В., Гришин А.В.</i>	
Постановка и решение краевой задачи нестационарного теплопереноса применительно к трехслойной системе.....	341
<i>Аль-Бусаиди С.С.С., Пономарев С.В.</i>	
Процедурная модель осуществления процесса «8.9 Анализ со стороны руководства» в испытательной лаборатории.....	346
<i>Гришин А.В., Горбунова А.Ю., Овсянникова В.А., Овсянников О.А.</i>	
Метрологическая оценка погрешностей метода определения толщины покрытия на металлическом изделии.....	351

Чернышова Т.И., Курносов Р.Ю.

Оценка метрологической надежности процессорных средств теплофизических измерений.....355

Попов О.Н., Майникова Н.Ф.

Метрологическая оценка погрешностей при неразрушающем контроле температуры структурного перехода в полимере.....360

Конакова Ю.М., Малышева А.В., Гребенникова Н.М.

Система менеджмента качества на малых предприятиях.....364

Хворова К.С., Гребенникова Н.М.

К проблеме управления качеством видеоконтента для образовательного процесса.....368

Дмитриев О.С., Барсуков А.А.

Метрологическая оценка метода определения кинетических характеристик полимерных композитов при отверждении.....372

Сенкевич А.Ю.

Алгоритм определения количества измерений при неразрушающем тепловом контроле.....376

Сумин В.И., Смоленцева Т.Е.

Аспекты реализации управления качеством в производственных системах.....380

Беляев В.П., Мищенко С.В., Беляев П.С.

Метрологический анализ метода неразрушающего контроля коэффициента диффузии в тонколистовых анизотропных пористых материалах.....385

Аль-Бусаиди С.С.С.

К вопросу о выборе варианта управленческого решения при внедрении проекта улучшения деятельности испытательной лаборатории.....392

Гребенникова Н.М., Дивин А.Г., Сенкевич С.А.

Оценка качества работы макета роботизированного комплекса для мониторинга и сортировки фруктов.....395

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

УДК 536.2:378

Мищенко С.В., Пономарев С.В.
Mishchenko S.V., Ponomarev S.V.

ФГБОУ ВО "Тамбовский государственный технический университет", г.
Тамбов

Tambov State Technical University, Tambov

Мищенко Сергей Владимирович – д.т.н., профессор, профессор кафедры "Мехатроника и технологические измерения»; **Пономарев Сергей Васильевич** – д.т.н., профессор, профессор кафедры "Мехатроника и технологические измерения".

Mishchenko Sergei Vladimirovich – doctor of engineering, Professor, Professor of the Department "Mechatronics and technological measurements"; **Ponomarev Sergei Vasilievich** – doctor of engineering, Professor, Professor of the Department "Mechatronics and technological measurements".

Всесоюзные и международные теплофизические школы

All-union and international thermophysical schools

Ключевые слова: теплофизические свойства, измерение, школа молодых ученых, Моршанск, Одесса, Тамбов, Душанбе, история.

Аннотация: Рассмотрены события в истории Всесоюзных и Международных теплофизических школ.

Key words: thermal properties, measurement, school of young scientists, Morshansk, Odessa, Tambov, Dushanbe, history.

Abstract: Events in the history of All-Union and International thermophysical schools are considered.

Посвящается 50-летию Международных теплофизических школ

Dedicated to the 50th anniversary of the International Thermophysical Schools

Первая Всесоюзная теплофизическая школа была проведена в 1971 году. Инициаторами проведения первой Всесоюзной теплофизической школы были:

1. Лыков Алексей Васильевич - в то время Президент Академии наук Белорусской ССР, академик, доктор наук, профессор, который в течении значительного промежутка времени работал заведующим кафедрой физики Московского института химического машиностроения (МИХМа). Вернувшийся с фронта Кулаков Михаил Васильевич обучался на старших курсах этого вуза, а затем под руководством будущего академика А.В. Лыкова выполнял научно-исследовательскую работу в области теплофизических измерений. В конце пятидесятых годов в аспирантуру к Кулакову М.В. поступил Власов Валентин Викторович, который также занимался научными исследованиями в области автоматизации теплофизических измерений. Таким образом, научная школа в области теплофизических измерений связана с именем академика Лыкова А.В.

2. Дульнев Геннадий Николаевич – доктор технических наук, профессор, в то время заведующий кафедрой теплофизики Ленинградского института точной механики и оптики (ЛИТМО), являвшийся учеником профессора Кондратьева Г. М. – автора книг по применению методов регулярных режимов в теплофизических измерениях.

3. Власов Валентин Викторович – в то время кандидат технических наук, доцент ректор Тамбовского института химического машиностроения (ТИХМ), заведующий кафедрой автоматизации химических производств (АХП).

Во время научного семинара в начале июня 1971 года Валентин Викторович сообщил нам – студентам Тамбовского института химического машиностроения, что в июле под Моршанском будет проходить теплофизическая школа, предложил приехать туда и послушать лекции ведущих учёных-теплофизиков Советского союза. При этом он добавил, что студентам придётся помогать на кухне, чистить картошку и выполнять другие работы, но зато можно будет посещать лекции. Жить можно будет в палатках, т.к. в июле в Тамбовской области обычно бывает хорошая погода.

Участников первой Всесоюзной теплофизической школы (ВТФШ-1) встречали на железнодорожном вокзале, на автовокзале и в аэропорту города Тамбова. Пленарное заседание было проведено в Доме политического просвещения (в здании с колоннами на улице Державинской, сейчас в нем размещается Тамбовский областной краеведческий музей). После завершения пленарного заседания, все участники переехали в пансионат Моршанской суконной фабрики, расположенный близ села Карели примерно в 10 километрах в сторону Шацка за Моршанском.

На второй день вечером был организован круглый стол, целью которого было предоставить возможность лекторам и участникам ВТФШ-1, приехавшим из различных республик и городов бывшего Советского союза, быстрее познакомиться друг с другом в неформальной обстановке.

В этот момент из Моршанска прибыл автобус, и члены коллектива художественной самодеятельности стали устанавливать микрофон, подключать усилитель и колонки, доставать музыкальные инструменты, короче говоря, готовились к концерту. "Школьники" (успевшие оценить высокий уровень приёма и гостеприимства, которые им были оказаны - дефицитные в то время пиво, вобла, болгарское вино, продукты в буфете, красная рыба и осетрина в столовой) стали хлопать прибывшим участникам художественной самодеятельности ещё до начала первого выступления.

Круглый стол и концерт прошли очень успешно, участники художественной самодеятельности великолепно пели и танцевали, а "школьники" искренне и от всей души им аплодировали.

Во время работы теплофизической школы все слушатели и мы (студенты) старались посещать все лекции. Скажем честно, мы в то время не все понимали, о чем рассказывали лекторы, но этот первый в жизни опыт общения с выдающимися учёными-теплофизиками (пусть только в качестве слушателей лекций) несомненно, был очень полезен.

Вторая (ВТФШ-2) и третья (ВТФШ-3) Всесоюзные теплофизические школы проходили в 1973 г. и в 1975 г. в летнее время в том же пансионате Моршанской суконной фабрики.

Вскоре после этого, из-за конфликта с руководством Тамбовского Обкома КПСС Власов Валентин Викторович был вынужден уехать из Тамбова. Позже он рассказывал, что Министерство высшего и среднего специального образования Российской Советской Федеративной Социалистической Республики (МВиССО РСФСР) планировало назначить его в Москву на должность руководителя главка. Однако первый секретарь Тамбовского Обкома КПСС (в то время член ЦК КПСС) по партийной линии не позволил руководителям МВиССО РСФСР осуществить запланированное. В результате этого, после перевода в Москву Власов В.В. был назначен на должность декана факультета повышения квалификации преподавателей и специалистов в МИХМ.

Валентину Викторовичу, теплофизику-экспериментатору, кроме стола, стула, бумаги и авторучки необходимо была материальная база в виде теплофизических устройств, электроизмерительных приборов. Поэтому, его переезд из Тамбова в Москву прошёл не совсем безболезненно. В.В. Власов продолжал руководить работой аспирантов Лабовской А.С., Зотова В.Н., Пономарева С.В., Панькова А.К., Подольского В.Е., Серegiной В.Г., Федорова Н.П., Чурикова А.А. Однако, он находился в Москве на значительном расстоянии от созданной им в течение десяти лет материально-технической базы и от своих аспирантов, проводивших под его руководством экспериментальные исследования в Тамбове. Валентин Викторович трагически погиб в августе 1982 года.

В 1977-1983 гг. последующие Всесоюзные теплофизические школы (ВТФШ-4, ..., ВТФШ-8) проходили в Одессе, Алма-Ате и других городах.

В конце декабря 1985 года ректором Тамбовского института химического машиностроения был назначен Мищенко С.В. - бывший аспирант и ученик В.В. Власова. Мищенко С.В. защитил диссертацию доктора технических

наук, которая была посвящена разработке автоматизированных систем научных исследований и проектирования процессов тепло- и массопереноса.

По инициативе С.В. Мищенко научной общественностью бывшего Советского союза было принято решение возобновить проведение Всесоюзных теплофизических школ на базе ТИХМ в городе Тамбове.

Оргкомитет очередной ВТФШ-9 возглавил Мищенко С.В., а в состав оргкомитета вошли: академик Шашков А.Г. (г. Минск), профессор Дульнев Г.Н. (г. Ленинград), академик Скрипов В.П. (г. Свердловск), профессор Косов Н.Д. (г. Алма-Ата), профессор Зиновьев В.Е. (г. Екатеринбург), профессор Шульман З.П. (г. Минск) и другие видные учёные-теплофизики бывшего Советского союза. На этом этапе проведения теплофизических школ Пономареву С.В. было поручено выполнять обязанности Ученого секретаря оргкомитета ВТФШ-9.

Очередные девятая и десятая всесоюзные теплофизические школы (ВТФШ-9 и ВТФШ-10) была проведена на базе ТИХМа в в конце весны и в начале лета 1988 года и 1990 года в гостинице «Турист» в пригородном лесу г. Тамбова. Для участия в ВТФШ-9 и ВТФШ-10 приезжали более двадцати известных учёных-теплофизиков, а общее количество участников, включая аспирантов и студентов, превышало сто человек. Пленарные заседания проходили в Тамбовской областной библиотеке им. А.С. Пушкина.

Таблица 1. - Сведения об истории проведения ВТФШ и МТФШ.

№ п/п	Статус	Организаторы	Место проведения	Время проведения
1	Всесоюзная теплофизическая школа (ВТФШ-1)	Власов В.В. Дульнев Г.Н. Филиппов Л.П.	Тамбов, Моршанск	1971
2	Всесоюзная теплофизическая школа (ВТФШ-2)	Власов В.В. Дульнев Г.Н. Филиппов Л.П.	Тамбов, Моршанск	1973
3	Всесоюзная теплофизическая школа (ВТФШ-3)	Власов В.В. Дульнев Г.Н. Филиппов Л.П.	Тамбов, Моршанск	1975
4	Всесоюзная теплофизическая школа (ВТФШ-4)	?Геллер В.З. Дульнев Г.Н. Филиппов Л.П.	?Одесса	1977

5	Всесоюзная теплофизическая школа (ВТФШ-5)	Дульнев Г.Н. Косов Н.Д. Филиппов Л.П.	Одесса	1979
6	Всесоюзная теплофизическая школа (ВТФШ-6)	?	?	1981
7	Всесоюзная теплофизическая школа (ВТФШ-7, конференция)	Герашенко О.А.	Киев	1983
8	Всесоюзная теплофизическая школа (ВТФШ-8)	Косов Н.Д.	Алма-Ата	1985
9	Всесоюзная теплофизическая школа (ВТФШ-9)	Мищенко С.В. Пономарев С.В.	Тамбов	1988
10	Всесоюзная теплофизическая школа (ВТФШ-10)	Мищенко С.В. Пономарев С.В.	Тамбов	1990
11	Международная теплофизическая школа (МТФШ-1)	Фортов В.Е. Мищенко С.В. Пономарев С.В.	Тамбов	1992
12	Международная теплофизическая школа (МТФШ-2)	Фортов В.Е. Мищенко С.В. Пономарев С.В.	Тамбов	1995
13	Международная теплофизическая школа (МТФШ-3)	Фортов В.Е. Мищенко С.В. Пономарев С.В.	Тамбов	1998
14	Международная теплофизическая школа (МТФШ-4)	Фортов В.Е. Мищенко С.В. Пономарев С.В.	Тамбов	2001
15	Международная теплофизическая школа (МТФШ-5)	Фортов В.Е. Мищенко С.В. Пономарев С.В.	Тамбов	2004
16	Международная теплофизическая школа (МТФШ-6)	Фортов В.Е. Мищенко С.В. Пономарев С.В.	Тамбов	2007
17	Международная теплофизическая школа (МТФШ-7)	Фортов В.Е. Мищенко С.В. Пономарев С.В.	Тамбов	2010
18	Международная теплофизическая школа (МТФШ-8)	Абдурасулов А. Мищенко С.В. Сафаров М.М. Пономарев С.В.	Душанбе-Тамбов	2012
19	Международная теплофизическая школа (МТФШ-9)	Абдурасулов А. Мищенко С.В. Сафаров М.М.	Душанбе-Тамбов	2014
20	Международная теплофизическая школа (МТФШ-10)	Абдурасулов А. Мищенко С.В. Сафаров М.М.	Душанбе-Тамбов	2016
21	Международная теплофизическая школа (МТФШ-11)	Фортов В.Е. Мищенко С.В. Дивин А.Г.	Тамбов	2018
22	Международная теплофизическая школа (МТФШ-11)	Сон Э.Е. Мищенко С.В. Балабанов П.В.	Тамбов	2021
ВНИМАНИЕ! Просим всех, имеющих возможность уточнить данные об истории ВТФШ и МТФШ, представить сведения в оргкомитет МТФШ-12 (syponom@yahoo.com).				

Начиная с 1992 года Теплофизические школы в городе Тамбове приобрели статус Международных теплофизических школ, т.к. после распада Советского союза бывшие советские республики стали независимыми государствами. Кроме того, впервые в работе Первой международной теплофизической школы (МТФШ-1) в 1992 году приняли участие известные учёные из стран дальнего зарубежья, в частности, профессор Нью-Йоркского университета Thomas F. Irvine из США (позже совместно с ним в Нью-Йоркском издательстве Begell House, Inc была опубликована монография (Ponomarev S.V., Mishchenko S.V., Irvine T.F. Measurements of Thermophysical Properties by Laminar Flow Methods. - New-York: Begell House Inc., 2001. – 278 p. ISBN 1-56700-151-3), Магда О. Сампаио - профессор университета в городе Порто (Португалия).

Последующие 2 - 6 Международные теплофизические школы в 1995 - 2010 годы была проведены также в г. Тамбове.

В 2010 году в оргкомитет Международных теплофизических школ обратился профессор Сафаров М.М. (являющийся одним из организаторов теплофизических исследований, проводимых в Таджикистане) с просьбой разрешить ему провести несколько последующих МТФШ в г. Душанбе - столице республики Таджикистан. Оргкомитет принял решение согласиться с предложением известного учёного-теплофизика профессора М.М. Сафарова.

Восьмая, девятая и десятая международные теплофизические школы были проведены в 2012 г., в 2014 г. и в 2016 г. в городе Душанбе - столице Республики Таджикистан. Сопредседателями оргкомитета были ректор Таджикского технического университета профессор Абдурасулов А.А. и профессор Мищенко С.В., заместителями председателя – профессор Сафаров М.М., профессор Гортышов Ю.Ф. и профессор Пономарев С.В., Учеными секретарями доцент Зарипова М.А. и доцент ТГТУ Балабанов П.В.

Одиннадцатая международная теплофизическая школа «Информационно-измерительные системы в теплофизических исследованиях» была проведена

6 - 9 ноября 2018 года в городе Тамбове на базе ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет».

Во время работы всех ВТФШ и МТФШ «школьникам» всегда была предоставлена возможность послушать пленарные доклады, лекции знаменитых учёных-теплофизиков, а также практиковалось заслушивание кратких устных докладов молодых учёных и обсуждение стендовых сообщений соискателей, аспирантов и студентов, являвшихся слушателями школ.

После окончания официальной части - заслушивания и обсуждения пленарных выступлений, лекций, докладов и стендовых сообщений - молодые учёные (во время проведения всесоюзных теплофизических школ, а в дальнейшем и международных теплофизических школ) имели возможность встретиться с ведущими учёными и обсудить с ними свои планы выполнения научно-исследовательских и диссертационных работ. В течение двух - трёх вечеров обычно проводились так называемые круглые столы с участием академика Шашкова А.Г., профессора Арутюнова Б.А., профессора Дульнева Г.Н., профессора Зиновьева В.Е, профессора Коздобы Л.А., профессора Косова Н.Д., профессора Филиппова Л.П., профессора Шульмана З.П. и др.

В ряде случаев по вечерам, наряду с обсуждением научных проблем, учёные старшего поколения вспоминали свою молодость и рассказывали о том, как они выполняли научные исследования под руководством своих руководителей из ещё более старшего поколения учёных-теплофизиков. Наиболее интересными и запомнившимися были рассказы «о прошлом и былом» академика Шашкова А.Г., профессора Дульнева Г.Н., профессора Филиппова Л.П. и профессора Шульмана З.П.

Очередная Двенадцатая международная теплофизическая школа (МТФШ-12) вновь проводится с 19 по 21 октября 2021 года в городе Тамбове на базе ФГБОУ ВО «Тамбовском государственном техническом университете».

УДК 536.21

**Бернардо Буономо, Анна Ди Паска, Оронцио Манка, Сергио Наппо,
Сергио Нардини**
**Bernardo Buonomo, Anna Di Pasco, Oronzio Manca, Sergio Napo, Sergio
Nardini**

Mr. Oronzio Manca - full professor at University of Campania Luigi Vanvitelli formerly Second University of Naples.

**Анализ масштаба пор теплового и гидродинамического поведения в
открытых металлических пенах с наножидкостями**

**Pore scale analysis of thermal and hydrodynamic behavior in open metal
foams with nanofluids**

В последние годы исследование течения жидкости в пористых средах представляет большой интерес для инженеров и ученых. Во многих областях применения, таких как холодильная, автомобильная, аэрокосмическая, перерабатывающая промышленность и теплообменники, энергетические системы и хранилища тепловой энергии, для повышения тепловых характеристик используются пористые среды. Металлические пены являются новым типом материала и используются для улучшения теплообмена во многих компонентах и системах. На соответствующее поведение влияет структура пены и такие параметры, как диаметры ячеек, стойки и плотность пор, форма стоек и пористость. Структура может быть реализована формовочным технологическим процессом или аддитивным производством (АП). Это неупорядоченная случайная (стохастическая) структура или АП-упорядоченная структура соответственно. Структуры обладают различными гидродинамическими и тепловыми характеристиками. Огромные области применения в теплопередаче металлических пеноматериалов, как стохастических, так и упорядоченных, и необходимость улучшения характеристик конвективной теплопередачи определяют необходимость более глубокого понимания феноменологии для оценки перепада давления и

локального коэффициента теплопередачи на уровне пор, как подчеркивается в литературе. В настоящем исследовании для анализа различных характеристик наножидкостей выполнен анализ на ячейках Кельвина, которые могут представлять как стохастическую пену, так и упорядоченную пену. Также представлены некоторые результаты, связанные с анализом генерации энтропии.

Сафаров М.М.
Safarov M.M.

Таджикский технический университет имени акад. М.С. Осими,
Душанбе, Таджикистан
Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe,
Tajikistan

Махмадали Махмадиевич Сафаров - Заслуженный деятель науки и техники Таджикистана, д.т.н., профессор, ТТУ имени акад. М.С. Осими, (Душанбе, Таджикистан).

Makhmadali Makhmadievich Safarov - Honored Worker of Science and Technology of Tajikistan, Doctor of Technical Sciences, Professor, TTU named after M.S. Osimi, (Dushanbe, Tajikistan).

Развитие теплофизической школы и теплофизических исследований в Таджикистане

Development of the thermophysical school and thermophysical research in Tajikistan

Ключевые слова: теплопроводность, теплоемкость, плотность, температуропроводность, наножидкости, катализатор, сплавы, наночастицы (Ag, Al, Cu, Ni, Fe, ОСУНТ, МСУНТ, A_2IO_3 , CuO, Fe_2O_3 и др.), метод регулярного теплового режима первого рода (цилиндрический бикалориметри акалориметр), метод монотонного разогрева (ИТЛ-400, ИТС_р-400), сканирующий калориметр, метод гидростатического взвешивания, метод капиллярного вискозиметра.

Аннотация: В докладе приводятся этапы развития теплофизической школы и исследования теплофизического измерения сплавов на основе меди, никеля и др., жидких и газообразных углеводородов и их смесей, катализаторов на основе пористого гранулированного оксида алюминия с различными нанонаполнителями (меди, никеля, кобальта, рутения, иридия и др.), жидкостей с внедрением в них различных наночастиц, температур и давлений.

Keywords: thermal conductivity, heat capacity, density, thermal conductivity, nanofluids, catalyst, alloys, nanoparticles (Ag, Al, Cu, Ni, Fe, OSUNT, MSUNT, A_2IO_3 , CuO, Fe_2O_3 , etc.), method of regular thermal regime of the first kind (cylindrical bicalorimetric calorimeter), method of monotonic heating (ИТЛ-400, ИТС_р-400), scanning calorimeter, hydrostatic method weighing, capillary viscometer method.

Abstract: The report describes the stages of the development of the thermophysical school and the study of thermophysical measurement of alloys

based on copper, nickel, etc., liquid and gaseous hydrocarbons and their mixtures, catalysts based on porous granular aluminum oxide with various nano-pollutants (copper, nickel, cobalt, ruthenium, iridium, etc.), liquids with the introduction of various nanoparticles, temperatures and pressures into them.

Развитие теплофизических измерений в Таджикистане началось в 70-е годы прошлого века. Лаборатория под названием “Теплофизические измерения” была организована в Душанбинском государственном педагогическом институте имени Т.Г. Шевченко (организатор - профессор Х. Маджидов, будучи аспирантом Азербайджанского педагогического института имени В.И. Ленина). Научным руководителем Х. Маджидова являлся д.т.н., профессор К.Д. Гусейнов - знаменитый теплофизик Азербайджана, который работал проректором по науке вышеназванного института г. Баку. Надо отметить, что профессор К.Д. Гусейнов был моим вторым научным руководителем по кандидатской диссертации. В Таджикистане впервые была организована лаборатория Теплофизики в Педагогическом институте в 1971 г. Экспериментальная установка для измерения теплопроводности жидкостей и газов – цилиндрический бикалориметр (установка И.Ф. Голубева), работающая методом регулярного теплового режима, была разработана в ГИАП г. Москвы под руководством профессора И.Ф. Голубева и была передана самолетом в г. Душанбе. Необходимо отметить, что цилиндрический бикалориметр, который имел размеры высота 26 см, диаметр 12 см, был изготовлен из красной меди (приблизительно весил 20 кг) и был доставлен в Душанбе аспирантом кафедры “Общая физика“ ДГПИ имени Т. Г. Шевченко, профессором Кодировым Б.А. Профессор Маджидов Х.М. после защиты кандидатской диссертации на тему ”Теплопроводность ацетатов в зависимости от температуры и давления”, научный руководитель д.т.н., профессор Гусейнов Камал Дадашогли, защитился в ТГУ имени В.И. Ленина в 1972 г. Символически, организация Всесоюзной теплофизической школы или Международной теплофизической школы (1971 г.) совпадает с организацией лаборатории Теплофизики в Таджикистане. В связи с чем поздравляю всех

школьников и участников МТФШ с юбилеем, т.е. с 50-летием организации МТФШ (ВТФШ) и организации Школы теплофизиков в Таджикистане. В период 1970-1990 гг. в Педуниверситете имени С. Айни под руководством профессора Маджидова Х.М. в лаборатории Теплофизики проводились хозяйственные работы с институтами г. Москвы (Космическим центром) и Ленинграда (ГИПХ). В коллективе под руководством Х. Маджидова тоже работал в качестве сотрудника. В коллективе, который занимался исследованием теплофизических свойств катализаторов на основе пористой гранулированной оксиды алюминия с различными нанонаполнителями, как Ni, Cu, Ni, Co, Ru, Ir и др. Рядом с нами работали Двойкин Е.П., Богданов А.И (к.ф.-м.н., доцент). Халилов М. (к.т.н.), Нуриддинов З. (к.т.н., доцент), Якубов М.Я., Зубайдов С. (к.т.н., доцент), Неъматов А. (к.ф.-м.н., доцент) и др. Под руководством Х. Маджидова в диссертационных советах г. Москвы, Ленинграда (Санкт-Петербурга), Минска (Беларусь), Баку (Азербайджан) они успешно защитили кандидатские и докторские диссертации. В 1990 г. Маджидов Х. (г. Минск, Институт проблемы энергетики, НАНТ Беларусь) и в 1994 г. Сафаров М.М. (г. Минск, Институт проблемы энергетики, НАНТ Беларусь) успешно защитили докторскую диссертацию, посвященную исследованию теплофизических параметров катализаторов и водных растворов гидразина, использующихся в ракетно-космических комплексах СССР. Под руководством профессора Х. Маджидова успешно защитились 7 соискателей. В 1980-1986 гг. по распоряжению Москвы во всех вузах и научных учреждениях Советского Союза были распределены установки для измерения теплопроводности и теплоемкости твердых тел в интервале температур (от температуры жидкого азота до 400 К ИТЛ-400, ИТС_р-400), которые выпускались на Актюбинском электротехническом заводе (установки, разработанные профессором Е.С. Платуновым). Как известно, для нашей республики установки достались Таджикскому педагогическому институту, Таджикскому политехническому институту и Худжандскому институту им. ак. Б. Гафурова. В настоящее время некоторые из них

используют исследователи, занимающиеся теплофизическим измерением. В годы независимости Таджикистана в нашей Теплофизической школе развивалось направление теплофизического измерения. В частности, под руководством профессора М.М. Сафарова в ТТУ имени акад. М.С. Осими развивались процессы изучения теплофизических свойств наножидкостей при различных температурах и давлениях и концентрации наночастиц.

При изучении теплофизических свойств композиционных материалов, наножидкостей соискатели, научным руководителем которых является профессор М.М. Сафаров, используют как экспериментальные, так и теоретические модели. В частности, для определения коэффициента теплопроводности наножидкостей, сыпучих материалов при различных температурах, давлениях и концентрации наночастиц используются модели Максвелла и профессора Г.Н. Дульнева и его учеников. Кроме того, для определения теплофизических и кинетических свойств материалов при различных температурах и давлениях членами Теплофизической школы получено 64 патента Евразии, России, СССР и Республики Таджикистан. По результатам измерения членами нашей школы опубликовано 24 монографии. Под руководством профессора М.М. Сафарова на сегодняшний день защитились 52 участника Таджикской школы теплофизиков, из них 5 докторов технических наук и 47 кандидатов наук. Среди ученых школы теплофизиков Таджикистана работают члены-корр. НАНТ (Кобулиев З.В.) и заслуженные деятели науки и техники Таджикистана (Маджидов Х. и Сафаров М.М., Зарипова М.А., Юсупов Ш.Т., Собиров Дж. Ф. и др.). Как отмечалось выше, МТФШ исполняется 50 лет. В этот период неоднократно из числа наших школьников многие участвовали в научных конференциях, которые проводились в г. Тамбове, Алма-Аты и г. Душанбе. В частности, профессора Х. Маджидов и М.М. Сафаров, начиная с 1983 г., в Тамбове (Моршанск и Тамбов) регулярно участвовали с докладами на заседаниях МТФШ. Надо отметить, что заседания ВТФШ проводились в разных городах бывшего Советского Союза: в Одессе, Алма-Аты и Душанбе. Заседания

МТФШ-8 (2012) [1], МТФШ-9 (2014) [2] и МТФШ-10 (2016) [3] проводились в г. Душанбе. Зам. председателя являлся профессор М.М. Сафаров. На этих конференциях участвовали и выступали с докладами профессора С.В. Мищенко (Тамбов), Ю.Ф. Гортышов (Казань), Г.Н. Дульнев (Санкт-Петербург), С.В. Пономарев (Тамбов), И.В. Баранов (Санкт-Петербург), С.П. Рудобашта (Москва), Б.А. Аратюнин (Москва), И.В. Поярков (Алма-Аты, Москва), А.Г. Дивин (Тамбов), Р.М. Эмиров (Махачкала), А.А. Мирзоев (Челябинск), Р.А. Мирзоев (Санкт-Петербург), А.Д. Ивлиев (Екатеринбург), С.А. Танаева (Минск), Р.М. Урусов (Бишкек), член-корр. АН РК К.М. Жумалиев (ученик Аскар Акаева) (Бишкек) и др.

В настоящее время ученики профессора М.М. Сафарова изучают теплофизические, термодинамические и кинетические характеристики различных материалов в зависимости от температуры и давления, в частности коллоидных наножидкостей на основе углеродосодержащих жидкостей. В качестве нанодобавки в чистые жидкости и растворы добавляют различные модифицированные нанодобавки, в том числе ОСУНТ, МСУНТ, оксиды и чистые металлы (Ag, Al, Cu, Ni, Fe, Al_2O_3 , CuO, Fe_2O_3 и др.) и др. Выполняют докторские диссертации (к.т.н. Гуломов М.М. (ТГПУ имени С. Айни), к.п.н. Ойматова Х.Х.(БГУ имени Носира Хусрава), к.т.н. Зарипов Дж. А. (ТТУ имени акад. М.С. Осими), к.т.н. Тиллоева Т.Р. (ТТУ имени акад. М.С. Осими), к.т.н. Тагоев С.А.(ТТУ имени акад. М.С.Осими), и др.) [4].

27-28 августа 2021 г. на кафедре “Теплотехники и теплоэнергетики” ТТУ имени акад. М.С. Осими было проведена Республиканская научно-практическая конференция (с международным участием) в которой было заслушано более 60 научных докладов по различным темам теплофизических исследований [4]. Данная конференция была приурочена по истине знаменательным датами, т.е. 30-летию Независимости Таджикистана, 65-летию ТТУ имени акад. М.С. Осими и 70-летию МТФШ [4].

Список литературы

1. **Материалы** Восьмой Международной теплофизической школы, посвящен-ной 60-летию академика ИА РТ, чл.-корр. МИА, академика МАХ Сафарова Махмадали Махмадиевича, Душанбе - Тамбов -2 012. - 695 с.
2. **Материалы** Девятой Международной теплофизической школы, Душанбе-Тамбов - 2014. - 819 с.
3. **Материалы** Десятой Международной теплофизической школы, Душанбе - Тамбов - 2016. - 608 с.
4. **Материалы** республиканской научно-практической конференции (с между-народным участием), «ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙ-СТВА ВЕЩЕСТВ», посвященной 30-летию государственной независимости Республики Таджикистан, 65-летию Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими и 50-летию МТФШ, 27-28 августа 2021, Душанбе, 253 с.

Пономарев С.В.
Ponomarev S.V.

ФГБОУ ВО "Тамбовский государственный технический университет",
г. Тамбов

Tambov State Technical University, Tambov

Пономарев Сергей Васильевич – д.т.н., профессор, профессор кафедры "Мехатроника и технологические измерения».

Ponomarev Sergei Vasilievich – doctor of engineering, Professor, Professor of the Department "Mechatronics and technological measurements".

**К вопросу о получении целевой функции и решении задач
оптимизации методов и устройств для измерения теплофизических
свойств веществ**

**To the question of obtaining the objective function and solving
optimization problems of methods and devices for measuring the
thermophysical properties of substances**

Ключевые слова: температуропроводность, объемная теплоемкость, измерение, относительные погрешности, минимизация, тепловой импульс, обработка данных, конструкционный размер, оптимизация.

Аннотация: рассмотрена методология выбора оптимальных условий проведения процесса измерения и обработки экспериментальных данных, определения основного конструкционного размера измерительного устройства, а также оптимальной длительности теплового импульса при применении метода линейного импульсного источника теплоты.

Key words: thermal diffusivity, volumetric heat capacity, measurement, relative errors, minimization, thermal impulse, data processing, structural size, optimization.

Abstract: the methodology of choosing the optimal conditions for the measurement process and processing experimental data, determining the main structural size of the measuring device, as well as the optimal duration of the heat pulse when using the method of a linear pulsed heat source is considered.

При выборе оптимальных значений режимных параметров методов и основных конструкционных размеров устройств для измерения теплофизических свойств (ТФС) веществ необходимо правильно задать функционал (целевую функцию), используемую при постановке и решении задачи оптимизации. На кафедре «Мехатроника и технологические

измерения» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» накоплен опыт [1 - 14] проектирования методов и устройств для измерения ТФС веществ на основе решения задач оптимизации с использованием целевых функций, для получения которых (с применением методов математической метрологии) рекомендуется использовать следующий порядок действий (методологию):

1) с применением методов математической физики [1 – 3, 5, 8 11] записывают постановку прямой краевой задачи теплопроводности, описывающей температурное поле внутри образца материала при проведении экспериментального измерения ТФС; примеры таких работ проведены в публикациях [1 – 6, 8 – 11];

2) с применением методов математической физики получают решение прямой краевой задачи теплопроводности, например, как это показано в [1 - 6];

3) на основе решения прямой краевой задачи получают расчётные формулы для вычисления искомых ТФС по экспериментальным данным; примеры получения таких результатов приведены в [1 - 6, 8 – 11]; следует отметить, что иногда возможно получение таких формул на основе постановки прямой краевой задачи теплопроводности без использования ее аналитического решения, как это показано, например, в [1, 3, 10, 11, 14];

4) с использованием полученных формул (на основе методов математической метрологии и теории погрешностей [1, 8, 13]) - получают расчётные формулы для вычисления среднеквадратичных оценок относительных погрешностей косвенных измерений искомых ТФС, зависящих от: а) режимных параметров проведения процесса измерения; б) основных размеров измерительного устройства; в) параметров применяемого алгоритма обработки экспериментальных данных; г) погрешностей измерения физических величин, непосредственно определяемых в процессе эксперимента;

5) в дальнейшем эти расчётные соотношения используются в качестве целевой функции при математическом моделировании погрешностей измерения ТФС [1, 2, 8] и решении задач оптимизации методов и устройств для измерения искомых ТФС.

В докладе приведён пример применения изложенного выше порядка действий для решения задачи оптимизации метода линейного импульсного источника теплоты и основного конструкционного размера устройства для измерения теплофизических свойств твёрдых материалов.

Результаты применения рассмотренной в докладе методологии были использованы при разработке методов и устройств для измерения теплофизических свойств жидкостей и твёрдых материалов и опубликованы в работах [1, 2, 4 - 6, 8, 10] на русском языке и в публикациях [3, 11] на английском языке.

Список литературы

1. **Пономарев С.В.** и др. Теоретические и практические основы теплофизических измерений: монография / Под ред. С.В. Пономарева. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 408 с
2. **Гуров А.В.** Измерение теплофизических свойств теплоизоляционных материалов методом плоского «мгновенного» источника теплоты: монография/ А.В. Гуров, С.В. Пономарев. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013. – 100 с.
3. **Gurov A.V.** The choice of the optimum conditions for measuring the thermal properties of materials by the plane «instantaneous» heat source method / A.V. Gurov, G.A. Sosedov, S.V. Ponomarev // Measurement Techniques. – 2012. – V.55, N. 10. - PP. 1187–1192.
4. **Пономарев С.В.** О выборе оптимальных условий измерения теплофизических свойств веществ методом линейного «мгновенного» источника тепла / С.В. Пономарев, И.Н. Исаева, С.Н. Мочалин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2010. – Том 76, №5. – С. 32-36.

5. **Мочалин С.Н., Пономарев С.В.** Измерение характеристик влагопереноса тонколистových капиллярно-пористых материалов методом «мгновенного» источника влаги: монография / С.Н. Мочалин, С.В. Пономарев. – М.: «Спектр», 2010. – 100 с.

6. **Пономарев С.В.** Оптимизация измерения 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.

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

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

9. **Пономарев С.В.** Минимизация погрешностей измерений коэффициентов теплопроводности и температуропроводности теплоизоляционных материалов методом плоского импульсного источника теплоты / С.В. Пономарев, Е.В. Буланов, В.О. Буланова, А.Г. Дивин // Измерительная техника. – 2018. – № 12. – С. 43 – 46.

10. **Пономарев С.В.** Методы и устройства для измерения эффективных теплофизических характеристик потоков технологических жидкостей / С.В. Пономарев, С.В. Мищенко. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 1997. – 248 с. ISBN 5-230-24512-3

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

12. **Корн Г.** Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1973. – 832 с.
13. **Зайдель А.Н.** Ошибки измерений физических величин / А.Н. Зайдель. – Л.: Наука, 1974. – 108 с.
14. **Власов В.В.** Теплофизические измерения. Справочное пособие по методам расчёта полей, характеристик тепломассопереноса и автоматизации измерений / В.В. Власов, Ю.С. Шаталов, С.В. Пономарев и др. // Изд. ВНИИРТМАШ, Тамбов, 1975. – 256 с.

**Ахтямов Э.Р.¹, Горбатов В.И.^{2,3}, Ивлиев А.Д.^{4,5}, Полев В.Ф.²,
Куриченко А.А.²**
**Akhtyamov E.R.¹, Gorbatov V.I.^{2,3}, Ivliev A.D.^{4,5}, Polev V.F.²,
Kurichenko A.A.²**

¹Институт УралНИИстром г. Челябинск, Россия; ²Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия; ³ФГБУН Институт теплофизики УрО РАН, Екатеринбург; ⁴Российский государственный профессионально-педагогический университет г. Екатеринбург, Россия; ⁵НЧОУ ВО «Технический университет УГМК»г. Верхняя Пышма, Свердловская обл., Россия

¹Institute UralNIИstrom Chelyabinsk, Russia; ²Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia; ³FGBUN Institute of Thermophysics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg; ⁴RUSSIAN State Vocational Pedagogical University Yekaterinburg, Russia; ⁵NCHOU VO "UMMC Technical University" g. Verkhnyaya Pyshma, Sverdlovsk region, Russia

Ахтямов Эльдар Рашидович - г. Челябинск, Россия, Институт УралНИИстром, директор; **Горбатов Владимир Иванович** - г. Екатеринбург, Россия, Уральский государственный горный университет, к.ф.-м.н., доцент; ФГБУН Институт теплофизики УрО РАН, Екатеринбург, ст. научн. сотр.; **Ивлиев Андрей Дмитриевич** - г. Екатеринбург, Россия, Российский государственный профессионально-педагогический университет, д.ф.-м.н. профессор; г. Верхняя Пышма, Свердловская обл., Россия, НЧОУ ВО «Технический университет УГМК», профессор; **Полев Владимир Федорович** - г. Екатеринбург, Россия, Уральский государственный горный университет, к.ф.-м.н., доцент; **Куриченко Алексей Алексеевич** - г. Екатеринбург, Россия, Уральский государственный горный университет, к.ф.-м.н., доцент.

Akhtyamov Eldar Rashidovich - Chelyabinsk, Russia, UralNIИstrom Institute, Director; **Gorbatov Vladimir Ivanovich** - Yekaterinburg, Russia, Ural State Mining University, Ph.D., Associate Professor; FSBI Institute of Thermophysics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, art. **Andrey Dmitrievich Ivliev** - Yekaterinburg, Russia, Russian State Vocational Pedagogical University, Ph.D., Professor; Verkhnyaya Pyshma, Sverdlovsk Region, Russia, NCHOU VO "UMMC Technical University", Professor; **Vladimir Fedorovich Polev** - G. Yekaterinburg, Russia, Ural State Mining University, Ph.D., Associate Professor; **Alexey A. Kurichenko** - Yekaterinburg, Russia, Ural State Mining University, Ph.D., Associate Professor.

Температуропроводность и удельное электрическое сопротивление твердых растворов системы никель-ванадий в интервале температур 300-1500 К

Thermal conductivity and electrical resistivity of solid solutions of the nickel-vanadium system in the temperature range of 300-1500 K

Ключевые слова: температура, температуропроводность, удельное электрическое сопротивление, переходные металлы.

Аннотация: Представлены сведения о высокотемпературных свойствах твердых растворов системы никель-ванадий. Показано, что по мере нагрева расширяется область концентраций, в пределах которой обеспечивается растворимость компонентов. Правило Нордгейма для изученных сплавов выполняется, однако его вид свидетельствует об изменении величины плотности состояний коллективизированных электронов в зависимости от концентрации компонентов.

Key words: temperature, thermal conductivity, electrical resistivity, transition metals.

Abstract: Information on the high-temperature properties of solid solutions of the nickel-vanadium system is presented. It is shown that with heating, the concentration range expands, within which the solubility of the components is ensured. The Nordheim rule for the studied alloys is fulfilled, but its appearance indicates a change in the density of states of collectivized electrons depending on the concentration of components.

Сплавы системы никель-ванадий (Ni-V) все более широко используются в промышленности. К настоящему времени имеются сведения о свойствах сплавов для некоторых конкретных концентраций компонентов, соответствующих тем или иным практическим потребностям. Однако с единых позиций свойства системы изучены не были. В данной работе предпринята попытка детально рассмотреть свойства твердых растворов Ni-V в диапазоне высоких температур.

Ванадий и никель принадлежат к побочным подгруппам пятой и восьмой групп Периодического закона Д. И. Менделеева. Свойства атомов этих элементов отличаются достаточно заметно. Достаточно отметить, что атомные объемы их отличаются на 20% [1]. При повышенных температурах никель имеет гранецентрированный кубический (ГЦК) тип кристаллической решетки, а ванадий - объемноцентрированный кубический (ОЦК) [2].

Естественно, что диаграмма состояний этой системы сложна и еще не известна во всех деталях [1, 3]. Тем не менее, установлено, что области твердых растворов, как обычно, располагаются вблизи чистых компонентов. Так, со стороны никеля, эта область при 700 К составляет 15 ат. %, а при 1500 К достигает 43 ат. %. Со стороны ванадия область твердых растворов при 700 К составляет примерно 3-4 ат. %, а при 1500 К – до 24 ат. % никеля. Область концентраций сплавов от 43 ат. % до 76 ат. % ванадия даже вблизи температур плавления твердым раствором не является, а представляет собой в зависимости от концентрации различные интерметаллиды.

Исследуемые образцы были изготовлены в вакуумной дуговой печи с нерасходуемым вольфрамовым электродом в атмосфере гелия при давлении $0.5 \cdot 10^5$ Па. В качестве исходных компонентов использовались высокочистые порошковые материалы из никеля (Н-0) и ванадия (ВЭЛ-1). Для улучшения гомогенизации сплава проводился трехкратный его переплав. Всего был изготовлен 21 образец с содержанием ванадия от 1,72 ат. % до 88 ат. %. Кроме того, были изучены чистые никель и ванадий.

Исследования температуропроводности α выполнялись на установке, использующей метод температурных волн [4, 5]. Средняя квадратичная относительная погрешность измерения α составила 2-3 %. Частота модуляции (частота температурной волны) выбиралась из диапазона 4-12 Гц. Измерения выполнены в диапазоне температур от 800 К до температуры плавления.

Исследования удельного электросопротивления ρ проводились на постоянном токе на установке, принцип действия которой основан на законе Ома [6]. Средняя квадратичная относительная погрешность измерения ρ составила 2 %. Измерения выполнены в диапазоне температур от 300 К до температуры плавления.

На рис. 1 показаны политермы температуропроводности твердых растворов сплавов Ni-V со стороны никеля для концентраций ванадия не выше 6,82 ат. %. Диапазон температур соответствует парамагнитному

состоянию материалов [3]. Характер представленных политерм является типичным для металлических материалов на базе переходных металлов. Зависимость температуропроводности от температуры T носит в основном неубывающий характер. Температуропроводность чистого никеля близка к справочным данным [7]. Некоторое падение $a(T)$ чистого никеля при самых высоких температурах, возможно, связано с проявлением процессов предплавления, приводящих к увеличению рассеяния носителей энергии.

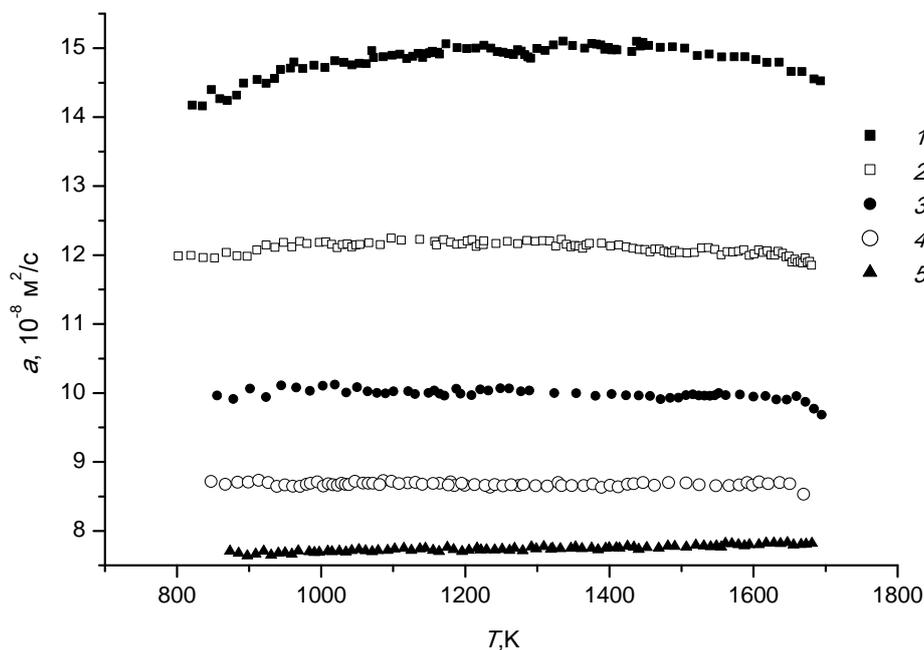


Рис. 1. Температуропроводность сплавов Ni-V (1 – чистый Ni; 2 – 1.72; 3 – 3.53; 4 – 5.15; 5 – 6.82 ат. %V).

Политермы температуропроводности твердых растворов Ni-V, имеющие бóльшую долю ванадия, в окрестности температуры 1100 К обнаруживают нерегулярность, характер которой свидетельствует о дополнительном вкладе в теплоемкость, возникающем при этих температурах [8].

Если рассмотреть твердые растворы в диапазоне высоких концентраций ванадия, то их политермы температуропроводности проявляют свойства

металлических систем без наличия особенностей. Температуропроводность чистого ванадия близка к справочным данным [7].

На рис. 2 показаны температурные зависимости удельного электросопротивления для твердых растворов Ni-V в диапазоне концентраций ванадия до 6.82 ат. %.

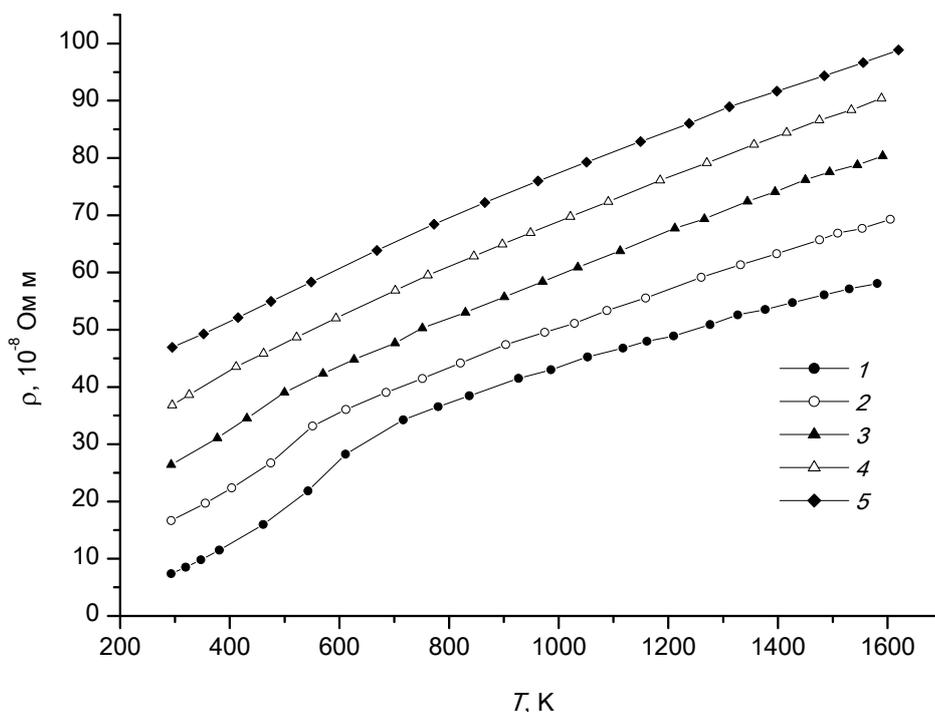


Рис. 2. Удельное электрическое сопротивление сплавов Ni-V (1 – чистый Ni; 2 – 1.72; 3 – 3.53; 4 – 5.15; 5 – 6.82 ат. %V).

Характер политерма также соответствует металлическим проводникам. На политерме $\rho(T)$ чистого никеля вблизи 650 К прослеживается перегиб, характерный для температуры Кюри. На температурных зависимостях $\rho(T)$ твердых растворов Ni-V, соответствующих большим концентрациям ванадия, аномальные участки не наблюдаются. Аналогично, на политермах удельного электросопротивления твердых растворов, богатых ванадием, характер зависимости остается типичным для проводников, без каких-либо аномалий. Значения удельных электросопротивлений чистых никеля и ванадия близки к справочным данным [7].

Оценки электронного вклада в соответствии с законом Видемана-Франца [9] показывают, что перенос энергии в твердых растворах Ni-V осуществляется, в основном, электронами. Это позволяет при обсуждении полученных результатов сделать акцент на электронные свойства сплавов. Рассматривая политермы теплофизических свойств, следует отметить, что их изменения в рамках модели [10, 11], могут быть связаны фононным вкладом. В частности, снижение крутизны нарастания электросопротивления при повышении температуры является результатом снижения плотности состояний тяжелых d-электронов, что имеет место и для многих других переходных металлов и сплавов [11].

Особый интерес вызывает рассмотрение концентрационных зависимостей. Характер их изменения показывает, что по мере повышения температуры все большая часть температурных зависимостей укладывается в монотонную зависимость, которая при температуре 1400 К превращается в типичную кривую Нордгейма. Это свидетельствует о том, что вблизи температуры плавления с точки зрения анализа кинетических явлений все изученные зависимости принадлежат к твердым растворам. Этот вывод противоречит данным диаграммы состояния [1, 3]. Максимум концентрационной зависимости электросопротивления приходится на область концентраций 25-40 ат. % ванадия. Это говорит о том, что и максимум плотности состояний соответствует этим значениям концентраций, в отличие от, например, сплавов иттрий-гольмий, где энергетическая структура электронов не зависела от концентрации компонентов.

Следовательно, в системе Ni-V по мере повышения температуры происходит значительное расширение области существования твердых растворов. Вблизи температуры плавления все исследованные образцы проявляют кинетические свойства, характерные именно для растворов.

Список литературы

1. **Вол А.Е.** Строение и свойства двойных металлических систем. В 4-х т. Т. 2. М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1962. – 982 с.
2. **Тонков Е.Ю.** Фазовые диаграммы элементов при высоком давлении. М.: Наука, 1979. 192 с.
3. **Диаграммы** состояния двойных металлических систем: Справочник: В 3-х т.: Т. 3. Кн. 1 / Под общ. ред. Н. П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 2001. – 872 с.
4. **Ивлиев А.Д.** Метод температурных волн в теплофизических исследованиях // ТВТ. 2009. Т. 47. № 5. С. 771-792.
5. **Ивлиев А.Д., Куриченко А.А., Мешков В.В., Гой С.А.** Методика ГСССД МЭ 207–2013. Методика экспериментального исследования температуропроводности конденсированных материалов с использованием температурных волн // ГСССД. Аттестат № 207. Деп. в ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» 20.03.2013. № 902а–2013 кк.
6. **Ивлиев А.Д., Черноскутов М.Ю., Мешков В.В.** Методика экспериментального определения электрического сопротивления металлических проводников в диапазоне температур от 300 К до 2000 К. / ГСССД. Аттестат № 274 (Методика ГСССД, зарегистрирована под № 274-2018 в Главном научном метрологическом центре «Стандартные справочные данные о физических константах и свойствах веществ и материалов» (ГНМЦ ССД), протокол НТС ФГУП «ВНИИМС» № 12 от 26 июня 2018 г.). Деп. в ФГУП «ВНИИМС» 26.06. 2018 г., № 266 - 2018 кк
7. **Зиновьев В.Е.** Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. М.: Металлургия, 1989. 384 с.
8. **Ивлиев А.Д.** Теплоемкость конденсированных материалов при высоких температурах. Микроскопические модели. / В кн. «Информационно-сенсорные системы в теплофизических исследованиях»: сборник научных

статей. В 2-х т. Тамбов, 6-9 ноября 2018 г.- Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2018. – Т. I. – 332 с. С. 48-54.

9. **Ziman J.M.** Electrons and Phonons. Oxford at the Clarendon Press. 1960.

(Имеется перевод: *Займан Дж.* Электроны и фононы. М.: Издательство иностранной литературы, 1962. 488 с.)

10. **Ивлиев А.Д.** Кинетические свойства твердого иттрия при высоких температурах. / Физика металлов и металловедение, 1993, т. 75, вып. 2. С. 8-14

11. **Ивлиев А.Д., Черноскутов М.Ю., Мешков В.В., Куриченко А.А., Морева Н.И.** Теплопроводность твердых растворов иттрий-гольмий. Разделение вкладов в рассеяние электронов проводимости. / V Международная научно-техническая конференция «Современные методы и средства исследования теплофизических свойств веществ». 23-24 мая 2019 г.: Сборник трудов. - СПб.: Университет ИТМО, 2019.- 322 с. С. 8-20.

eLIBRARY.RU <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42140558>

Секция 1
**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА**

УДК 66.021.3

**Ряжских А.В.
Ryazhskih A.V.**

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»,
г. Воронеж
Voronezh State Technical University, Voronezh

Ряжских Александр Викторович – к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры прикладной математики и механики.

Ryazhskih Alexandr Viktorovich – Candidate of physical and mathematical sciences, Associate Professor of the Department of Applied Mathematics and Mechanics.

Массоперенос в осесимметричной шарообразной бидисперсной области с идеальным контактом при заданной концентрации на внешней границе

Mass transfer in an axisymmetric spherical bidispersible region with an ideal contact at a given concentration at the outer boundary

Ключевые слова: бидисперсная осесимметричная шарообразная гранула, диффузионный перенос, аналитическое решение.

Аннотация: Методом разделения переменных Фурье получено точное аналитическое решение начально-краевой задачи при граничных условиях первого рода на внешней границе бидисперсной шаровой гранулы для системы параболических уравнений в частных производных в сферических координатах в формате 1-D, которое использовано для оценки кинетического коэффициента постулата Глюкауфа о скорости переноса в линейной модели с сосредоточенными параметрами.

Key words: bidisperse axisymmetric spherical granule, diffusion transfer, analytical solution.

Abstract: By the method of separation of Fourier variables, an exact analytical solution of the initial-boundary value problem was obtained under boundary conditions of the first kind on the outer boundary of a bidisperse spherical granule for a system of parabolic partial differential equations in spherical coordinates in 1-

D format, which was used to estimate the kinetic coefficient of Gluckauff's postulate on the transfer rate in linear lumped model.

Математическая модель, описывающая перенос массы по диффузионному механизму в бидисперсной шарообразной грануле с идеальным контактом двух последовательных разнопроницаемых осесимметричных областей при граничных условиях первого рода в безразмерном виде таково

$$\frac{\partial C_1(R, \theta)}{\partial \theta} = \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left[R^2 \frac{\partial C_1(R, \theta)}{\partial R} \right], \quad 0 \leq R < 1, \quad \theta > 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial C_2(R, \theta)}{\partial \theta} = \frac{D}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left[R^2 \frac{\partial C_2(R, \theta)}{\partial R} \right], \quad 1 \leq R < \eta, \quad \theta > 0; \quad (2)$$

$$C_1(R, 0) = C_2(R, 0) = 1; \quad (3)$$

$$C_1(1, \theta) = C_2(1, \theta); \quad (4)$$

$$\frac{\partial C_1(1, \theta)}{\partial R} = D \frac{\partial C_2(1, \theta)}{\partial R}; \quad (5)$$

$$C_2(\eta, \theta) = 0; \quad (6)$$

$$C_1(0, \theta) \neq \infty, \quad (7)$$

где $\theta = \tau D_1 / r_1^2$; $R = r / r_1$; $C_{1,2}(R, \theta) = [c_{1,2}(r, \tau) - c_s] / (c_0 - c_s)$; $D = D_2 / D_1$; $\eta = r_2 / r_1$; τ – время; r – радиальная координата; $r_{1,2}$ – радиусы областей; $c_{1,2}$ и $D_{1,2}$ – локальные концентрации и коэффициенты диффузии в грануле при $0 \leq r \leq r_1$ и $r_1 \leq r < r_2$ соответственно. Следуя адаптированному методу разделения переменных Фурье к подобным постановкам [1] получено аналитическое решение системы (1) – (7):

$$Q_i(R, \theta) = 1 - C_i(R, \theta) \quad (8)$$

$$Q_1(R, \theta) = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} [F(\mu_n, D, \eta) + \Phi(\mu_n, D, \eta)] \sin(\mu_n R) \times \exp(-\mu_n^2 \theta) / [R \Omega(\mu_n, D, \eta)]; \quad (9)$$

$$Q_2(R, \theta) = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} [F(\mu_n, D, \eta) + \Phi(\mu_n, D, \eta)] \left[A_2 \sin\left(\frac{\mu_n R}{\sqrt{D}}\right) + B_2 \cos\left(\frac{\mu_n R}{\sqrt{D}}\right) \right] \cdot \exp(-\mu_n^2 \theta) / [R\Omega(\mu_n, D, \eta)], \quad (10)$$

где

$$F(\mu_n, D, \eta) = -\frac{\mu_n \cos \mu_n - \sin \mu_n}{\mu_n^2} + A_2 \left[-\cos\left(\frac{\mu_n \eta}{\sqrt{D}}\right) \mu_n \eta D + \cos\left(\frac{\mu_n}{\sqrt{D}}\right) \mu_n D + D\sqrt{D} \sin\left(\frac{\mu_n \eta}{\sqrt{D}}\right) - D\sqrt{D} \sin\left(\frac{\mu_n}{\sqrt{D}}\right) \right] / (\mu_n^2 \sqrt{D});$$

$$\Phi(\mu_n, D, \eta) = B_2 \left[\sin\left(\frac{\mu_n \eta}{\sqrt{D}}\right) \mu_n D \eta - \sin\left(\frac{\mu_n}{\sqrt{D}}\right) D \mu_n + D\sqrt{D} \cos\left(\frac{\mu_n \eta}{\sqrt{D}}\right) - D\sqrt{D} \cos\left(\frac{\mu_n}{\sqrt{D}}\right) \right] / (\mu_n^2 \sqrt{D});$$

$$\Omega(\mu_n, D, \eta) = \left\{ \mu_n - \frac{1}{2} \cos(2\mu_n) + (B_2^2 - A_2^2) \left[\frac{1}{2} \sqrt{D} \sin\left(\frac{2\mu_n \eta}{\sqrt{D}}\right) - \frac{1}{2} \sqrt{D} \sin\left(\frac{2\mu_n}{\sqrt{D}}\right) + \mu_n (1 - \eta) \right] - 2A_2 B_2 \left[\cos^2\left(\frac{\mu_n \eta}{\sqrt{D}}\right) - \cos^2\left(\frac{\mu_n}{\sqrt{D}}\right) \right] \right\} / (2\mu_n).$$

Если $D=1$, то для любого значения η развитие профилей концентраций в одни и те же моменты времени остается одинаковым. При $D \ll 1$ проникновение вещества лимитируется проницаемостью области, примыкающей к поверхности гранулы, а для $D > 1$ наоборот – лимитирует процесс поглощения область, находящаяся в ядре гранулы. Следует заметить, что скорость процесса поглощения существенно выше при $D > 1$. Уменьшение радиуса контакта областей с разными проницаемостями уменьшает скорость поглощения вещества гранулой.

Воспользуемся полученным решением (8) - (10) для оценки параметра k линейной модели массообмена с сосредоточенными параметрами

$$\frac{d\bar{Q}(\theta)}{d\theta} = K [1 - \bar{Q}(\theta)], \quad (11)$$

где $K = kr_1^2/D_1$; $\bar{Q}(\theta) = \frac{1}{\eta^3}\bar{Q}_1(\theta) + \left(1 - \frac{1}{\eta^3}\right)\bar{Q}_2(\theta)$; $\bar{Q}_1(\theta) = 3\int_0^1 R^2 Q_1(R, \theta) dR$;

$$\bar{Q}_2(\theta) = \frac{3}{\eta^3 - 1} \int_1^\eta R^2 Q_2(R, \theta) dR.$$

В выражении безразмерной среднеобъемной концентрации

$$\begin{aligned} \bar{Q}(\theta) = 1 - \frac{3}{\eta^3} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\mu_n \cos \mu_n - \sin \mu_n}{\mu_n^2} + \frac{A_2}{\mu_n^2 \sqrt{D}} \left[-\mu_n D \eta \cos\left(\frac{\mu_n \eta}{\sqrt{D}}\right) + \right. \right. \\ \left. \left. + \mu_n D \cos\left(\frac{\mu_n}{\sqrt{D}}\right) + D \sqrt{D} \sin\left(\frac{\mu_n \eta}{\sqrt{D}}\right) - D \sqrt{D} \sin\left(\frac{\mu_n}{\sqrt{D}}\right) \right] + \right. \\ \left. + \frac{B_2}{\mu_n^2 \sqrt{D}} \left[\mu_n D \eta \sin\left(\frac{\mu_n \eta}{\sqrt{D}}\right) - \mu_n D \sin\left(\frac{\mu_n}{\sqrt{D}}\right) + \right. \right. \\ \left. \left. + D \sqrt{D} \cos\left(\frac{\mu_n \eta}{\sqrt{D}}\right) - D \sqrt{D} \cos\left(\frac{\mu_n}{\sqrt{D}}\right) \right] \right\} Z(\mu_n, D, \eta) \exp(-\mu_n^2 \theta) \quad (12) \end{aligned}$$

можно ограничиться одним членом ряда, тогда из (11) и (12) при $n = 1$ следует, что $K = \mu_1^2$,

откуда

$$k = \frac{\mu_1^2 \eta D_1}{r_2^2}. \quad (13)$$

В случае однородности гранулы по проницаемости ($D = 1$) кинетический параметр равен [2]

$$k_0 = \frac{\pi^2 D}{r_2^2}, \quad (14)$$

$\bar{D} = \frac{1}{\eta^3} D_1 + \left(1 - \frac{1}{\eta^3}\right) D_2$ - среднеобъемный коэффициент диффузии. Расчет показывает, например, для $D = 3$ и $\eta = 2$: $k = 1,21$, $k_0 = 13,57$. Это означает, что допущение об однородности гранулы может вносить существенную погрешность в оценку скорости поглощения вещества без учета реальной структуры.

Список литературы

1. **Ozisik M.N.** Heat conduction. – NY: Wiley-Interscience Publication, 1993. – 692 p.
2. **Largitte L.** A review of the kinetics adsorption models and their application to the adsorption of lead by an activated carbon / L. Largitte, R. Pasquier // Chem. Eng. Res. and Design. – 2016. – V. 109. – pp. 495-504. Doi:10.1016/j.cherd.2016.02.006.

**Ряжских В.И.¹, Хвостов А.А.¹, Журавлев А.А.², Ряжских А.В.¹
Ryazhskih V.I.¹, Khvostov A.A.¹, Zhuravlev A.A.², Ryazhskih A.V.¹**

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»,
г. Воронеж

²ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского
и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж

¹Voronezh State Technical University, Voronezh

²Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky
and Y.A. Gagarin Air Force Academy, Voronezh

Ряжских Виктор Иванович – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой прикладной математики и механики; **Хвостов Анатолий Анатольевич** – д.т.н., профессор, профессор кафедры прикладной математики и механики; **Журавлев Алексей Александрович** – к.т.н., доцент, доцент кафедры математики; **Ряжских Александр Викторович** – к.т.н., доцент, доцент кафедры прикладной математики и механики.

Ryazhskih Victor Ivanovich – Doctor of technical Sciences, professor, Head of the Department of Applied Mathematics and Mechanics; **Khvostov Anatoliy Anatolyevich** – Doctor of technical Sciences, professor, professor of the Department of Applied Mathematics and Mechanics; **Zhuravlev Alexey Alexandrovich** – Candidate of technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mathematics; **Ryazhskih Alexandr Viktorovich** – Candidate of technical Sciences, Associate Professor of the Department of Applied Mathematics and Mechanics.

Оценка погрешности расчета интегральных характеристик течения структурированных жидкообразных сред в цилиндрическом канале

Estimation of the integral characteristics calculating error of the structured liquid-like media flow in a cylindrical channel

Ключевые слова: модель Оствальда-де Виля, модель Карро, структурированная жидкость, реология, течение, вязкость.

Аннотация: Проведено исследование течения структурированной жидкости с реологическим законом Карро в круглой трубе. Результаты сопоставлены с аналогичными результатами, полученными в случае использования в качестве реологической модели степенного закона Оствальда-де Виля. Установлено, что реологическая модель Оствальда-де Виля при сравнительно низких скоростях течения приводит к существенным ошибкам в прогнозе интегральных параметров течения.

Key words: Ostwald-de Waele model, Carreau model, structured fluid, rheology, flow, viscosity.

Abstract: A study of the flow of a structured liquid with the Carreau's rheological law in a round pipe is carried out. The results are compared with similar results obtained in the case of using the Ostwald-de Waele power law as a rheological model. It is established that the Ostwald-de Waele rheological model at relatively low flow velocities leads to significant errors in the prediction of integral flow parameters.

Известно, что использование степенного уравнения Оствальда-де Вилля для описания осесимметричных сдвиговых течений структурированных жидкообразных сред приводит к существенным ошибкам в расчете интегральных параметров течения при сравнительно низких скоростях сдвига, что связано с неограниченным ростом вязкости при скорости сдвига $\dot{\gamma} \rightarrow 0$ [1, 2].

Преодолеть вычислительные проблемы, характерные для модели Оствальда-де Вилля и повысить точность предсказания интегральных параметров течения в широком диапазоне изменения скоростей сдвига, включая предельное значение $\dot{\gamma} \rightarrow 0$, можно путем регуляризации уравнения Оствальда-де Вилля. На сегодня предложено несколько реологических уравнений, которые учитывают конечные значения вязкости при предельных значениях скорости сдвига, наиболее распространенным из которых является уравнение Карро [2]

$$\mu = \mu_{\infty} + (\mu_0 - \mu_{\infty}) \left[1 + (\lambda \dot{\gamma})^2 \right]^{\frac{m-1}{2}}, \quad (1)$$

где μ_0 – наибольшая вязкость практически неразрушенной структуры, Па·с; μ_{∞} – наименьшая вязкость предельно разрушенной структуры, Па·с; $\dot{\gamma} = \sqrt{2\mathbf{S}:\mathbf{S}}$ – скорость сдвига, с⁻¹; $\mathbf{S} = \frac{1}{2} \left[\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \right]$ – тензор скорости деформации; $|\mathbf{u}|$ – скорость, м/с; m – показатель кривизны реологической кривой $\mu(\dot{\gamma})$; λ – время релаксации, с.

Целью работы явилось численное исследование течения структурированной жидкости с реологическим законом Карро в круглой

трубе и сопоставление параметров течения с аналогичными параметрами, полученными в случае использования в качестве реологической модели уравнения Оствальда-де Виля.

Объектом моделирования явилась помадная масса кондитерского производства. Экспериментальные данные сдвиговой вискозиметрии формализованы в виде степенной модели Оствальда-де Виля и Карро (рис. 1). Реологические константы модели Оствальда-де Виля (консистентная переменная $K = 471,47$, индекс течения $n = 0,3$) определены по методу наименьших квадратов. Для нахождения констант модели Карро ($\mu_0 = 16054,5$ Па·с, $\mu_\infty = 1,04$ Па·с, $\lambda = 155,6$ с, $m = 0,301$) использовали алгоритм параметрической регуляризации [3].

В области экспериментальных значений скорости сдвига обе модели предсказывают удовлетворительное согласие с экспериментальными данными и между собой. При малых скоростях сдвига (до $0,01$ с⁻¹) модель Карро предсказывает постоянную вязкость $\mu_0 = 16054,5$ Па·с, что свидетельствует о течении с неразрушенной структурой, в то время как модель Оствальда-де Виля демонстрирует неограниченный рост вязкости.

Математическая модель установившегося изотермического и ламинарного течения структурированной несжимаемой жидкости в горизонтально расположенной цилиндрической трубе формализована в виде уравнений сохранения массы и импульса [4]

$$\begin{cases} \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot \left[-P\mathbf{I} + \mu(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T) \right], \\ \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

где ρ – плотность, кг/м³; $|\mathbf{u}|$ – скорость, м/с; P – давление, Па; \mathbf{I} – единичный тензор; μ – вязкость, Па·с.

Расчетная область моделирования задана границами: Ω_1 – входное сечение канала; Ω_2 – цилиндрическая поверхность канала (стенка); Ω_3 – выходное сечение канала. Граничные условия имеют вид:

$$\Omega_1: \mathbf{u} = -u_0 \mathbf{n}; \quad \Omega_2: \mathbf{u} = 0; \quad \Omega_3: [-P\mathbf{I} + \mathbf{K}]\mathbf{n} = P_{атм} \mathbf{n}, \quad (3)$$

где u_0 – скорость входного потока, м/с; \mathbf{n} – вектор нормали к соответствующей границе расчетной области; \mathbf{K} – тензор вязких напряжений; $P_{атм}$ – атмосферное давление, Па.

Вычислительный эксперимент показал (рис. 2), что степенная модель предсказывает завышенные значения перепада давления, особенно при значении объемного расхода меньше $1 \cdot 10^{-5}$ м³/с. С уменьшением объемного расхода различия в предсказаниях перепада давления по моделям Оствальда-де Виля и Карро существенно возрастают. Так, например, при значении объемного расхода $1,13 \cdot 10^{-7}$ м³/с степенная модель Оствальда-де Виля предсказывает перепад давления, завышенный примерно в 3 раза, чем по модели Карро. Существенные различия связаны с тем, что степенная модель предсказывает бесконечно большую вязкость при $\dot{\gamma} \rightarrow 0$ на оси потока, в то время как модель Карро при $\dot{\gamma} \rightarrow 0$ демонстрирует существование конечной вязкости. При более высоких значениях объемного расхода напорно-расходные характеристики течения жидкостей Оствальда-де Виля и Карро совпадают.

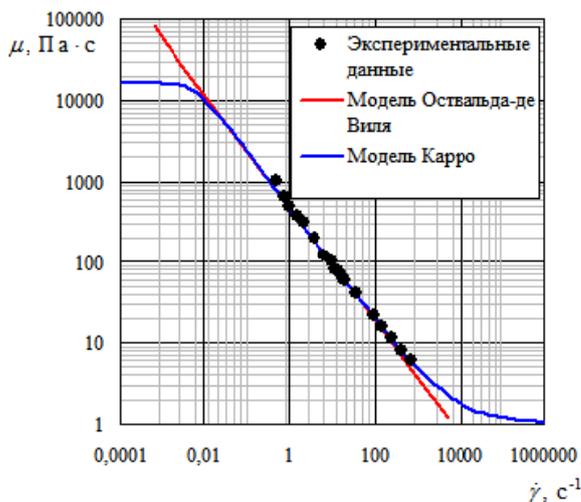


Рис. 1. Зависимость вязкости от скорости сдвига.

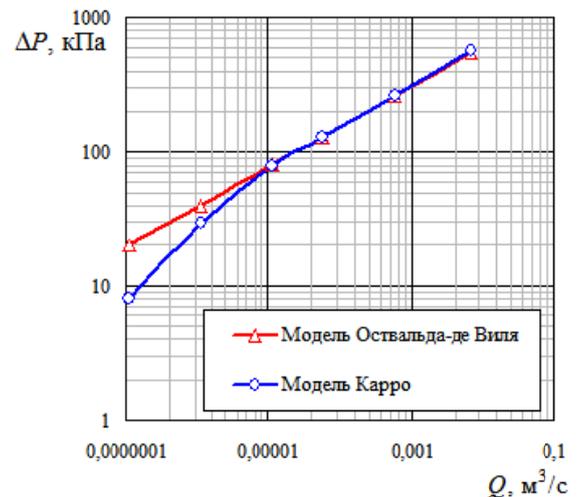


Рис. 2. Напорно-расходная характеристика.

Полученные результаты качественно согласуются с данными работ [1, 5], в которых сопоставлены результаты осесимметричных течений жидкостей Оствальда-де Виля и Эллиса, обладающей предельной вязкостью μ_0 при скорости сдвига $\dot{\gamma} \rightarrow 0$.

Точность расчета интегральных параметров осесимметричных течений структурированных жидкообразных сред существенно зависит от принятой реологической модели и кинематических режимов течения.

При сравнительно низких скоростях течения реологическая модель Оствальда-де Виля приводит к существенным ошибкам в прогнозе интегральных параметров течения. Для повышения точности расчета следует использовать реологическую модель Карро, которая учитывает предельные значения вязкости структурированной жидкости. При сравнительно высоких скоростях течения использование степенной модели Оствальда-де Виля не приводит к существенным ошибкам расчета интегральных параметров течения.

Полученные результаты следует учитывать при расчете интегральных параметров осесимметричных течений в трубах и формующих каналах, в зазорах между вращающимися валками и пр.

Список литературы

1. **Шаповалов В.М.** Степенное реологическое уравнение в прикладных задачах неньютоновской гидромеханики : монография / В.М. Шаповалов, В.Ф. Каблов; ВПИ (филиал) ВолгГТУ. – Волгоград : Изд-во ВолгГТУ, 2020. – 230 с.
2. **Matveenko V.N.** Structural Rationale of a Non-Newtonian Flow / V.N. Matveenko, E.A. Kirsanov // Moscow University Chemistry Bulletin. – 2017. – Vol. 72, № 2. – P. 69 – 91. <https://doi.org/10.3103/S0027131417020031>.
3. **Хвостов А.А.** Идентификация реологических параметров структурированных жидкообразных сред на основе метода регуляризации

А.Н. Тихонова / А.А. Хвостов, А.А. Журавлев, А.А. Никитченко // Математические методы в технологиях и технике. – 2021. – № 1. – С. 88 – 91.

4. **Математическое** моделирование гидродинамики и теплообмена в движущих жидкостях / под ред. Э.М. Карташова. – СПб.: Лань, 2019. – 208 с.

5. **Shapovalov V. M.** On Application of the Ostwald-de Waele model to description of Non-Newtonian fluid flow in the nip of counter-rotating rolls / V. M. Shapovalov // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2018. Vol. 91, № 2. – P. 405 – 410. <https://doi.org/10.1007/s10891-018-1761-8>.

Печенегов Ю.Я.¹, Косов В.А.²
Pechenegov Yu.Y.¹, Kosov V.A.²

¹ФГБОУ ВО «Энгельсский технологический институт (филиал)
Саратовского государственного технического университета им. Гагарина
Ю.А.», г. Энгельс

²ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю.А.», г. Саратов

¹FGBOU HE "Engels technological institute (branch) of Saratov state technical
university named after Gagarin Yu.A.", Engels

²FGBOU HE "Saratov state technical university named after Gagarin Yu.A.",
Saratov

Печенегов Юрий Яковлевич – д.т.н., профессор, профессор кафедры «Технология и оборудование химических, нефтегазовых и пищевых производств»; **Косов Виктор Андреевич** – студент бакалавриата по направлению «Теплоэнергетика и теплотехника».

Pechenegov Yuriy Yakovlevich – doctor of technical school, professor, professor of the department "Technology and equipment of chemical, oil and gas and food industries"; **Kosov Viktor Andreevich** – bachelor's student in the direction of "Heat power engineering and heat engineering".

Компактный многопоточный трубчатый змеевик для теплопередающих установок

Compact multi-flow tubular coil for heat transfer plants

Ключевые слова: поверхность теплопередачи, трубчатый змеевик, компактность, теплообмен, гидравлическое сопротивление.

Аннотация: Предложен многопоточный трубчатый змеевик для использования в качестве поверхности теплопередачи в различных устройствах. Обсуждаются преимущества предложенного змеевика по отношению к традиционно используемым змеевикам с прямыми трубами, соединенными между собой приварными крутоизогнутыми отводами.

Keywords: heat transfer surface, tubular coil, compactness, heat exchange, hydraulic resistance.

Abstract: A multi-threaded tubular coil is proposed for use as a heat transfer surface in various devices. The advantages of the proposed coil in relation to traditionally used coils with straight pipes connected by welded steeply curved taps are discussed.

Трубчатые змеевиковые поверхности теплопередачи широко используются в теплотехнологических устройствах нефтегазовой, химической и других отраслях промышленности, в частности, в нагревателях нефти и нефтяной эмульсии. Конструктивно такие поверхности обычно выполняются как однопоточные трубчатые змеевики, в которых прямые трубы-шпильки соединены между собой приварными крутоизогнутыми отводами. Минимальное расстояние между осями смежных труб в змеевиках по существующей технологии изготовления отводов ограничено величиной $1,75d$, где d – наружный диаметр труб. Данное обстоятельство, в свою очередь, накладывает ограничение на увеличение площади поверхности теплопередачи в единице объёма, занимаемого змеевиком, что препятствует созданию теплотехнологических устройств высокой компактности.

Увеличить компактность теплопередающих трубчатых поверхностей позволяет использование предложенного в работе [1] змеевика коллекторного типа, имеющего малое расстояние между трубами и отличающегося простотой конструкции и технологичностью изготовления. Развитием конструкции [1] является предложенный одним из авторов настоящей статьи многопоточный трубчатый змеевик [2], представленный на рис. 1. Змеевик [2] содержит ряд прямых труб, открытые концы которых соединены между собой трубчатыми соединительными элементами – коллекторами, в которых с помощью дисков - перегородок в диаметральных сечениях, установленных с помощью, например, сварных заклепок, образованы поворотные отсеки.

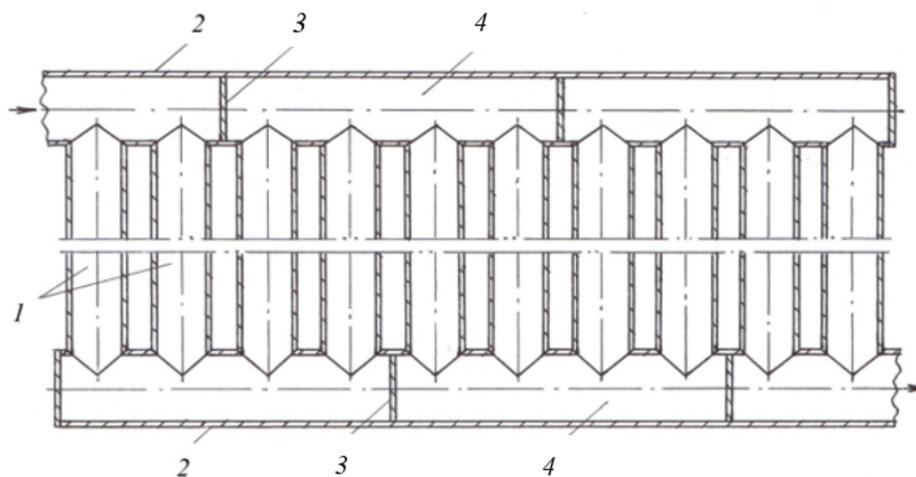


Рис. 1. Многопоточный трубчатый змеевик: 1 – трубы; 2 – соединительные элементы – коллекторы; 3 – дисковые перегородки; 4 – поворотные отсеки.

За счет многопоточности движения текучей среды в одном змеевике несколькими параллельными потоками возможно уменьшить скорость движения среды, увеличить время пребывания её в змеевике, увеличить площадь теплопередачи в единице объема змеевиковых поверхностей, а также снизить гидравлическое сопротивление.

Для сравнения компактности предложенного змеевика и змеевика, в котором прямые трубы соединены крутоизогнутыми отводами с шагом равным двум диаметрам труб, использован параметр $\varphi = (V_k/V_o)_{F = \text{idem}}$, где V_k и V_o – объемы соответственно предложенного змеевика и змеевика с отводами при одинаковых площадях F поверхностей теплопередачи. Расчеты показали, что при шахматной компоновке труб в трубном пучке, составленном из сравниваемых змеевиков и принятом для змеевика [2] расстоянии между образующими соседних прямых труб равным 0,02 м, параметр $\varphi = 0,28$ и он не зависит от диаметра труб в змеевиках. При коридорной компоновке труб в пучке параметр φ уменьшается с ростом диаметра d труб и особенно заметно в области малых величин d . Например, при $d = 0,03$ м $\varphi = 0,67$, при $d = 0,09$ м $\varphi = 0,35$, а при $d = 0,15$ м $\varphi = 0,32$. То есть, для рассмотренных условий

предложенный змеевик имеет сниженные в несколько раз габариты по отношению к традиционному змеевику.

Дополнительное повышение компактности теплообменного устройства с предложенным змеевиком, имеющим малый шаг размещения труб, достигается за счет уменьшения площади поверхности теплопередачи из-за более интенсивного внешнего теплообмена при обтекании тесных поперечно обтекаемых пучков труб по отношению к разреженным пучкам. В экспериментальной работе [3], например, получено двойное увеличение интенсивности теплообмена с уменьшением шага труб.

К преимуществам предложенного змеевика относится также отсутствие внутри труб подкладных колец, которые в соответствии с существующей технологией сварки труб с отводами в традиционном змеевике применяют для обеспечения соосности свариваемых элементов. При отсутствии подкладных колец уменьшается гидравлическое сопротивление змеевика, упрощается его изготовление. Кроме того, крутоизогнутые отводы традиционных змеевиков имеют значительные остаточные внутренние напряжения, различные толщины стенки по внутренней и внешней образующим и овальность сечения. На практике в процессе работы это приводит к частым повреждениям змеевиков с высоким внутренним давлением, которые проявляются в виде раскрытия труб по нейтральной линии (боковая образующая) гибов. Местные внутренние напряжения и структурные изменения металлагиба являются очагами коррозионных процессов. В предлагаемом змеевике гибы отсутствуют и связанные с ними проблемы при эксплуатации не возникают.

Для расчетов гидравлического сопротивления и теплообмена потока в предложенном змеевике могут быть использованы опытные зависимости, полученные в работах [4, 5].

Список литературы

1. Патент РФ № 2382973С1, МПК F28F1/00. Оpubл. 27.02.2010. Бюл. №6.
2. Патент РФ № 2747570, МПК F28F1/00. Оpubл. 07.05.2021. Бюл. № 13.
3. **Козлова Л.Г.** Теплоотдача шахматного пучка, образованного спаренными цилиндрами / Л.Г. Козлова, В.И. Нелипович, Э.Я. Эпик // Теплообмен в энергетических установках. – Киев: Наукова думка, 1978. –С. 94 – 96.
4. **Печенегов Ю.Я.** Экспериментальное исследование гидравлического сопротивления поворотов в компактном змеевике/ Ю.Я. Печенегов, И.П.Денисенко // Промышленная энергетика. – 2011, № 3.– С. 37 – 40.
5. **Печенегов Ю.Я.** Экспериментальное исследование теплообмена в поворотных камерах компактных змеевиков /Ю.Я. Печенегов, И.П.Денисенко // Химическое и нефтегазовое машиностроение. - 2013, № 11. – С. 6 – 10.

Печенегов Ю.Я.¹, Кузьмина Р.И.², Бурухина О.В.²
Pechenegov Yu.Y.¹, Kuzmina R.I.², Burukhina O.V.²

¹ФГБОУ ВО «Энгельсский технологический институт (филиал) Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю. А.», г. Энгельс; ²ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского», г. Саратов

¹Engels technological institute (branch) of Saratov state technical university named after Gagarin Yu.A., Engels; ²Saratov national research state university named after N. G. Chernyshevsky, Saratov

Печенегов Юрий Яковлевич - д.т.н., профессор, профессор кафедры «Технология и оборудование химической, нефтегазовой и пищевой промышленности»; **Кузьмина Раиса Ивановна** – д.х.н., профессор, профессор кафедры «Нефтехимия и техногенная безопасность»; **Бурухина Оксана Владиславовна** – к.х.н., доцент, доцент кафедры «Нефтехимия и техногенная безопасность».

Pechenegov Yuriy Yakovlevich - doctor of technical research, professor, professor of the department of "Technology and equipment of chemical, oil and gas and food industry"; **Kuzmina Raisa Ivanovna** – doctor of chemical sciences, professor, professor of the department of petro chemistry and technogenic safety; **Burukhina Oksana Vladislavovna** – ph.d., associate professor, associate professor of the department of petro chemistry and technogenic safety.

Методика расчета основных теплогидравлических характеристик твердотопливной каталитической печи длительного горения

Method of calculation of the main thermohydraulic characteristics of a solid-fuel catalytic furnace of long-term combustion

Ключевые слова: печь длительного горения, каталитическое дожигание газов, самотяга, гидравлическое сопротивление, теплонапряженность, высота дымовой трубы.

Аннотация: Разработана математическая модель печи с длительным горением загрузки твердого топлива, связывающая между собой основные параметры, характеризующие тепловую мощность, гидравлическое сопротивление печи, самотягу и высоту дымовой трубы. Предложена методика расчета печи. Приведены и обсуждаются результаты расчетов.

Keywords: long-term combustion furnace, catalytic after casing of gases, gravity, hydraulic resistance, heat stress, height of the chimney.

Abstract: A mathematical model of a furnace with a long burning of solid fuel loading has been developed, linking the main parameters characterizing the

thermal power, hydraulic resistance of the furnace, gravity and height of the chimney. A method for calculating the furnace is proposed. The results of calculations are given and discussed.

В [1] предложена конструкция отопительной воздухонагревательной печи, работающей при естественной тяге, с растянутым во времени горением одноразовой загрузки твердого топлива и каталитическим дожиганием горючих компонентов в газообразных продуктах горения. Испытания печи при каталитическом сжигании в ней разных видов топлива показали отсутствие химического недожога в уходящих газах.

В настоящей работе приводятся соотношения и связи между основными теплогидравлическими характеристиками и методика расчета печи. Расчетная схема печи приведена на рис. 1.

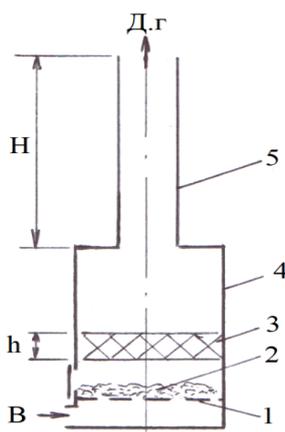


Рис. 1. Схема печи: 1 – колосниковая решетка; 2 – слой топлива; 3 – слой зернистого катализатора; 4 – корпус; 5 – дымовая труба; В – воздух; Д.г – дымовые газы.

Работа печи осуществляется следующим образом. На колосниковую решетку 1 загружается порция топлива весом M с низшей теплотой сгорания Q_H^P . При равномерном подводе воздуха через колосниковую решетку 1 засыпка топлива в слое 2 будет выгорать со скоростью

$$V = M/\tau, \text{ кг/с}, \quad (1)$$

где τ – назначаемое время полного сгорания засыпки топлива.

Образующиеся при горении топлива в слое 2 высокотемпературные газообразные продукты фильтруются через слой зернистого катализатора 3 толщиной h , где осуществляется конверсия газообразных продуктов недожога. Далее продукты полного сгорания охлаждаются, передавая через корпус 4 тепло воздуху в помещении и затем через дымовую трубу 5 высотой H удаляются в атмосферу за пределы помещения за счёт естественной тяги. В печи могут быть размещены дополнительные теплопередающие элементы для увеличения отбора тепла от дымовых газов, например, в виде параллельно включенных по газовому потоку оребренных снаружи труб с вставленными скрученными лентами [2].

При установившемся режиме работы печи выполняется равенство между потерей давления газового потока, обусловленной сопротивлением трения и местными сопротивлениями на пути движения потока, и движущей силой, создаваемой дымовой трубой за счет самотяги. Основное сопротивление потоку газов оказывает слой зернистого катализатора и равенство между движущей силой и сопротивлением запишем в виде

$$\Delta P_K = k \cdot \Delta P_T, \quad (2)$$

где потеря давления потока дымовых газов в слое катализатора, определяется по обобщенной формуле Эргуна [3]

$$\Delta P_K = \left[150 \frac{(1-\varepsilon)^2 \mu w}{\varepsilon^3 d_T^2} + 1.75 \frac{1-\varepsilon \rho w^2}{\varepsilon^3 d_T} \right] h, \quad (3)$$

а движущая сила, создаваемая дымовой трубой

$$\Delta P_T = (\rho_0 - \rho_T) g H. \quad (4)$$

Коэффициент k в формуле (2) учитывает влияние на потерю давления наличия дополнительных местных сопротивлений на пути движения потока дымовых газов и определяется выражением $k = 1 + \frac{\Delta P_{м.с}}{\Delta P_K}$, где $\Delta P_{м.с}$ – потеря давления потока дымовых газов в местных сопротивлениях.

В формулах (3) и (4) обозначено: ε – порозность слоя катализатора, принимается равной 0,4; μ – динамический коэффициент вязкости газа; w – скорость газа, отнесенная ко всему сечению слоя; ρ – плотность газа;

индексы «0» и «Т» указывают на условия в окружающей среде и в дымовой трубе соответственно.

Для определения основных теплогидравлических характеристик печи рассмотрим уравнение (2) совместно с уравнениями (3) и (4), учитывая зависимость динамического коэффициента вязкости дымовых газов среднего состава от температуры [4]

$$\mu = 15,8 * 10^{-6} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{0,727}, \text{ Па}\cdot\text{с} \quad (5)$$

и зависимость для плотности дымовых газов

$$\rho = 1,3 \left(\frac{T_0}{T}\right), \text{ кг/м}^3, \quad (6)$$

где Т – температура газов в слое катализатора, К; $T_0 = 273$ К.

Согласно [5], выход газообразных продуктов сгорания при сжигании 1 кг твердого топлива выражается приближенным соотношением

$$V = 1.25 \frac{Q_H^P}{3800}, \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (7)$$

Скорость газа в зависимости от температуры определяется формулой

$$w = B \frac{V}{f} \frac{T}{T_0}, \text{ м/с}, \quad (8)$$

где f – площадь поперечного сечения слоя катализатора.

Температуру газовых продуктов горения в слое катализатора определим выражением

$$T = 273 + \frac{Q_H^P \eta_{\text{пир}}}{V \rho_0 c_p}, \text{ К}, \quad (9)$$

где $\eta_{\text{пир}}$ – пирометрический коэффициент, учитывающий потери тепла, примем $\eta_{\text{пир}} = 0,9$; c_p – средняя теплоемкость продуктов горения в интервале температур от 273 К до Т, согласно [4],

$$c_p = 1,04 \left(\frac{T}{T_0}\right)^{0,131}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}, \quad (10)$$

С учетом зависимость (7) и $\rho_0 = 1,3$ кг/м³, уравнение (9) запишем в виде

$$T = 273 + \frac{4219,65}{T^{0,131}}. \quad (11)$$

Решение уравнения (11) даёт $T = 1848$ К или 1575 °С.

Используя полученное значение T и учитывая выражения (5)...(8), вместо (3) запишем

$$\Delta P_K = \left[1.192 \cdot 10^{-4} \frac{Q_T}{d_T^2} + 1.56 \cdot 10^{-5} \frac{Q_T^2}{d_T} \right] h, \quad (12)$$

где Q_T – тепловая мощность, выделяющаяся при горении топлива, приходящаяся на 1 м^2 площади поперечного сечения слоя катализатора,

$$Q_T = B \frac{Q_H^P}{f}, \text{ кВт/м}^2 \quad (13)$$

Из выражения для КПД печи

$$\eta_n = \frac{T - T_T}{T - T_0}, \quad (14)$$

для температуры газов в дымовой трубе имеем

$$T_T = T - \eta_n(T - T_0). \quad (15)$$

Учитывая, что $T = 1848 \text{ К}$, $T_0 = 273 \text{ К}$ и приняв $\eta_n = 0,8$, из (15) получим $T_T = 588 \text{ К}$ или 315°С .

При данной температуре, в соответствии с уравнением (4), имеем

$\Delta P_T = 6,83 \text{ Н}$. Используя полученное значение ΔP_T и уравнение (12), на основании связи (2) получим

$$Q_T^2 + \frac{7,64}{d_T} Q_T - 438 \cdot 10^3 \frac{H}{kh} d_T = 0. \quad (16)$$

Решением уравнения (16) является выражение для удельной тепловой мощности

$$Q_T = \sqrt{\frac{14,6}{d_T^2} + 438 \cdot 10^3 \frac{H}{kh} d_T} - \frac{3,82}{d_T}, \text{ кВт/м}^2. \quad (17)$$

Уравнение (17) и другие приведенные выше соотношения и связи для теплогидравлических характеристик печи могут быть использованы для определения основных ее технологических и конструктивных параметров при заданной тепловой мощности. Так, например, при $k = 1$, $h = 0,05 \text{ м}$, $d_T = 0,005 \text{ м}$ расчет по (17) дает при $Q_T = 50 \text{ кВт}$ величину $H = 1,8 \text{ м}$, при $Q_T = 100 \text{ кВт}$ получено $H = 3,7 \text{ м}$, а при $Q_T = 200 \text{ кВт}$ – $H = 7,88 \text{ м}$. Увеличение k при наличии дополнительных местных сопротивлений приводит к пропорциональному росту высоты дымовой трубы H . В

частности, при $k = 1,5$ для выше приведенных условий и значений Q_T соответствующие величины H равны 2,7 м, 5,55 м, 11,82 м.

Список литературы

1. **Твердотопливная** воздухонагревательная печь с каталитическим дожиганием газообразных продуктов неполного горения / А.Н. Макагон, Р.И. Кузьмина, О.В. Бурухина, Ю.Я. Печенегов // Информационно-сенсорные системы в теплофизических исследованиях: сб. научных статей. В 2-х т. Тамбов, 6-9 ноября 2018 г. – Тамбов: Изд. центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2018. – Т.1.– С. 164-166.

2. **Патент** РФ № 2707778, МПК F24B5/00, F24B1/22, F23C13/06. Каталитическая твердотопливная печь: Заявка №2018144517 от 14.12.2018: опубл. 29.11.2019 / Ю.Я. Печенегов, А.Н. Макагон: бюл. №34.

3. **Аэров М.Э.** Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем/М.Э.Аэров, О.М. Годес. – Л.: Химия, 1968. – 512 с.

4. **Печенегов Ю.Я.** Расчет физических свойств, теплообмена и гидравлического сопротивления газовых и жидких теплоносителей. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2011. – 116 с.

5. **Теплотехника** / А.П.Баскаков, Б.В.Берг, О.К.Витт и др. // Под ред. А. П. Баскакова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 224 с.

Печенегов Ю.Я.
Pechenegov Yu.Y.

ФГБОУ ВО «Энгельсский технологический институт (филиал)
Саратовского государственного технического университета имени Гагарина
Ю.А.», г. Энгельс
Engels technological institute (branch) of Saratov state technical university
named after Gagarin Yu.A., Engels

Печенегов Юрий Яковлевич – д.т.н., профессор, профессор кафедры «Технология и оборудование химической, нефтегазовой и пищевой промышленности».

Pechenegov Yuriy Yakovlevich – doctor of technical school, professor, professor of the department of technology and equipment of chemical, oil and gas and food industries.

**Энергоэффективное обезвоживание осадочного ила сточных вод
в среде перегретого пара испаряемой жидкости**

**Energy-efficient dewatering of sewage sedimentary sludge
in the environment of superheated vapor of evaporated liquid**

Ключевые слова: сушка, сушильный агент, атмосферная сушилка, перегретый пар, энергоэффективность.

Аннотация: приведено описание атмосферной сушилки, в которой в качестве сушильного агента используется перегретый пар испаряемой жидкости; на примере высушивания осадочного ила сточных вод показана высокая энергетическая эффективность сушилки.

Keywords: drying, drying agent, atmospheric dryer, superheated steam, energy efficiency.

Abstract: Description of an atmospheric dryer in which superheated vapor of evaporated liquid is used as a drying agent. On the example of drying sedimentary sludge of wastewater, the high energy efficiency of the dryer is shown.

При высушивании дисперсных материалов с капиллярно-связанной влагой удельный расход тепловой энергии составляет 5000 – 8000 кДж/кг испаренной влаги [1], а по данным [2], для пастообразных материалов и сушилок в химической промышленности удельный расход тепла достигает 26000 кДж/кг испаренной влаги. Данные показатели соответствуют сушилкам, где в качестве сушильного агента используются воздух или

продукты сгорания топлива, и значительно превышают теоретическую теплоту испарения 1 кг воды при атмосферном давлении, равную 2257 кДж/кг.

Перспективным, как сушильный агент, является перегретый водяной пар, имеющий ряд энергетических и технологических преимуществ перед воздухом и продуктами сгорания топлива [3]. В соответствии со схемами энергоиспользования, приведенными в [1, 3], взятый из котлов, отборов турбин и других сторонних источников перегретый пар, после использования в сушилке в качестве сушильного агента, направляется к внешним потребителям тепла, где отдает содержащееся в нем сбросное тепло и конденсируется. При таком многоступенчатом использовании потенциальной теплоты перегретого пара возможно получить существенный энергосберегающий эффект. Однако реализовать подобные схемы энергоиспользования далеко не всегда удастся из-за трудностей обеспечения гармонизации работы сушилки с внешними потребителями сбросного тепла или же отсутствия внешних потребителей на данном конкретном производстве. Если же перегретый пар используется в сушилке однократно, без утилизации сбросного тепла, то удельные затраты тепла на обезвоживание материала в этом случае почти в три раза больше, чем при использовании воздуха в качестве сушильного агента. По этим причинам, а также в связи с необходимостью и трудностями герметизации рабочей камеры сушилки с повышенным по отношению к атмосферному давлению, перегретый пар, обладая достоинствами как сушильный агент, до настоящего времени не получил широкого применения на практике.

Техническое решение, позволяющее использовать технологические преимущества перегретого пара, как сушильного агента, и обеспечивающее высокую энергетическую эффективность обезвоживания материала, реализовано в предложенной нам и сушилке (рис. 1) для дисперсных и пастообразных материалов [4]. Сушильным агентом в сушилке [4] служит перегретый пар испаряемой жидкости, находящийся под атмосферным

давлением. Сбросное тепло с выходящим сушильным агентом возвращается в сушилку, то есть используется внутренняя схема его утилизации.

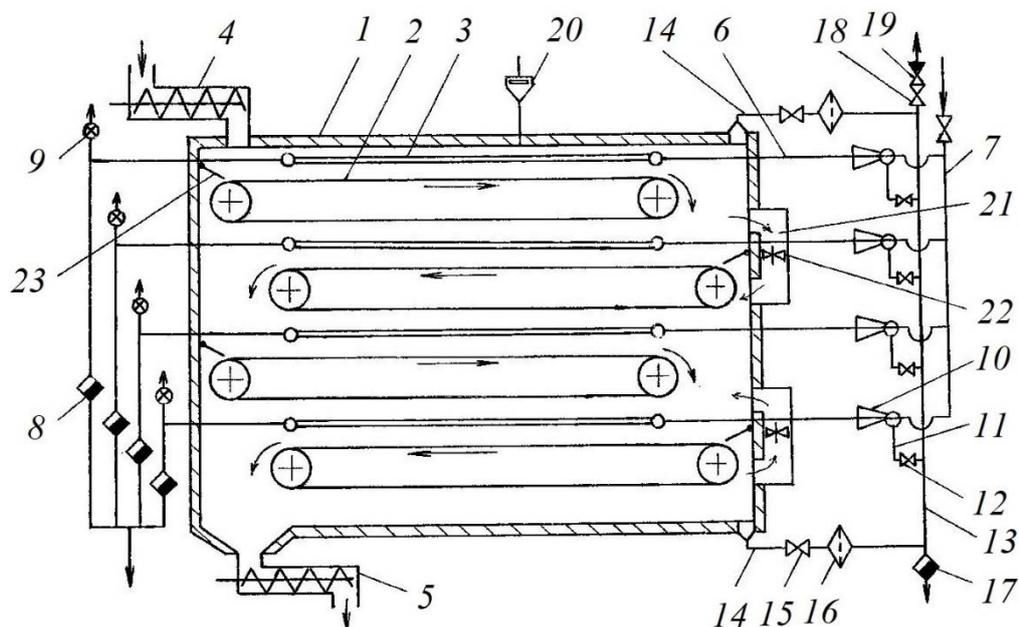


Рис. 1. Многоленточная паровая сушилка [4]: 1 – корпус; 2 – ленточные транспортеры; 3 – трубчатые регистры; 4 – загрузочное устройство; 5 – разгрузочное устройство; 6, 11, 14 – перегородки; 7 – трубопровод подвода пара; 8, 17 – конденсатоотводчики; 9 – воздушные клапаны; 10 – паровые эжекторы; 12, 15, 18 – запорно-регулирующие устройства; 13 – трубопровод отвода пара; 16 – фильтры; 19 – обратный клапан; 20 – прерыватель вакуума; 21 – циркуляционные каналы; 22 – вентиляторы; 23 – уплотняющие заслонки.

Работает сушилка следующим образом. Исходный влажный материал поступает в корпус 1 с помощью загрузочного устройства 4 и распределяется по ширине ленты верхнего транспортера 2. Сформированный непрерывный слой материала обогревается теплом, которое передается конвекцией от сушильного агента, циркулирующего в корпусе 1 с помощью вентиляторов 22, и радиацией от паровых трубчатых регистров 3. Пересыпаясь с одной ленты на другую, ниже расположенную ленту, которая движется во встречном направлении, материал в процессе транспортирования нагревается

и высушивается. С ленты нижнего транспортера 2 высушенный материал поступает в разгрузочное устройство 5 и выводится из корпуса 1. Внутреннее пространство корпуса 1 заполнено паром испарившейся из высушиваемого материала влаги. Данный пар является сушильным агентом. Обтекая паровые трубчатые регистры и воспринимая от них тепло, пар становится перегретым. По сравнению с воздухом, перегретый водяной пар имеет более высокие коэффициенты тепло- и массопереноса и теплоемкость, что способствует интенсификации процесса сушки. Выделившийся из высушиваемого материала пар выводится из корпуса 1 по перетокам 14, которые имеют запорно-регулирующие устройства 15 и фильтры 16, в трубопровод 13 отвода пара. Из трубопровода 13 по перетокам 11 пар поступает на входы паровых эжекторов 10. Эжектирующей средой, также подаваемой на вход эжекторов 10 из трубопровода 7, является первичный пар высокого давления, который поступает от внешнего источника. Образующаяся в эжекторах 10 паровая смесь с повышенным давлением относительно атмосферного поступает по перетокам 6 в паровые трубчатые регистры 3. Отдавая тепло через стенку регистров 3 сушильному агенту, паровая смесь конденсируется. Конденсат выводится через конденсатоотводчики 8, а выделяющиеся при конденсации воздух и инертные газы выводятся через воздушные клапаны 9.

Сжатие находящегося под атмосферным давлением пара испаренной из материала жидкости в струйных компрессорах – эжекторах приводит вместе с ростом давления и к увеличению его температуры насыщения. Последующее использование сжатого пара в качестве греющего теплоносителя в паровых трубчатых регистрах при наличии достаточной разности температур насыщения греющего пара и сушильного агента во внутреннем пространстве корпуса с атмосферным давлением позволяют обеспечить необходимый перегрев сушильного агента – пара испаренной жидкости.

Выполнен анализ высушивания в предложенной сушилке иловых осадков промышленных сточных вод с начальным влагосодержанием 340 % до

остаточного влагосодержания 40 %. Предварительно экспериментально были определены кинетические характеристики процесса сушки иловых осадков. Получено, что критическое влагосодержание осадочного ила, соответствующее границе перехода периода постоянной скорости сушки к периоду падающей скорости сушки, составляет $U_{кр} = 210 \div 235$ %. Для скорости сушки в период постоянной скорости получено

$$N_1 = 66 \text{ \%}/\text{ч},$$

а для периода падающей скорости —

$$N_2 = 17 + 0,2 \cdot U_{ср}, \text{ \%}/\text{ч}.$$

Полное время сушки осадочного ила в предложенной сушилке, определенное с использованием полученных кинетических характеристик, составляет $\tau = \tau_{\text{пост.ск.}} + \tau_{\text{перем.ск.}} = 0,72 + 2,34 = 3,06$ ч.т. При этом в паровых трубчатых регистрах абсолютное давление поступающего от паровых эжекторов пара равно 0,48 МПа. Согласно расчетам, удельный расход тепла, включающий в себя затраты на нагрев исходных влажных иловых осадков, испарение влаги, перегрев образующегося пара до температуры 120 °С, потери с конденсатом, выводимым из паровых трубчатых регистров, и потери через стенки корпуса в окружающую среду, составляет 4100 кДж/кг испаренной влаги. Ввод тепла для покрытия его затрат осуществляется за счет конденсации смеси эжектируемого пара и эжектирующего первичного пара высокого давления при температуре 150 °С в паровых трубчатых регистрах. Доля первичного пара высокого давления в смеси составляет 0,41 кг/кг смеси. По сравнению с воздушной сушилкой с паровым калорифером и однократным использованием сушильного агента - воздуха (без рециркуляции) удельный расход (кг/кг испаренной влаги) греющего первичного пара высокого давления в предлагаемой паровой сушилке [4] меньше в 2,43 раза. Стоимость сушки уменьшается в еще большей пропорции из-за значительно меньшего времени высушивания при сушильном агенте - перегретом паре.

Список литературы

1. **Данилов О. Л.** Экономия энергии при тепловой сушке / О. Л. Данилов, Б. И. Леончик. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 136 с.
2. **Романков П. Г.** Сушка во взвешенном состоянии / П. Г. Романков, Н. Б. Рашковская. – Л.: Химия, 1979. – 272 с.
3. **Михайлов Ю. А.** Сушка перегретым паром / Ю. А. Михайлов. – М.: Энергия, 1967. – 200 с.
4. **Патент** на изобретение № 2718632, Российская Федерация. Многоленточная паровая сушилка / Ю. Я. Печенегов [и др.]. – Заявка № 2019122824/06 от 19.07.2019; опубл. 10.04.2020, Бюл. № 10.

**Ходжармох Холмуродовна Ойматова¹, Шохин
Рустамович Сафаров¹, Мохира Абдусаломовна Зарипова²,
Махмадали Махмадиевич Сафаров²
Hojarmoh Kh. Oymatova¹, Shohin R.Safarov¹, Mohira A.
Zaripova², Mahmatali M. Safarov²**

¹Бохтарский государственный университет им. Носира Хусрава,
г. Бохтар, Таджикистан; ²Таджикский технический университет им. акад.
М.С. Осими, г. Душанбе, Таджикистан

¹Bokhtar State University named after Nosir Khusrav, Bokhtar, Tajikistan;
²Tajik Technical University named after acad. M.S. Osimi,
Dushanbe, Tajikistan

Ходжармох Холмуродовна Ойматова - доцент физики БГУ имени Носира Хусрава.; **Сафаров Шохин Рустамович** - преподаватель кафедры общая физика БГУ имени Носира Хусрава; **Зарипова Мохира Абдусаломовна** - Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими; **Сафаров Махмадали Махмадиевич** – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники Таджикистана, Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими.

Khodzarmokh Kholmurodovna Oymatova - Associate Professor of Physics at Nosira Khusrav BSU; **Safarov Shokhin Rustamovich** - Lecturer of the Department of General Physics at Nosira Khusrav BSU; **Zaripova Mokhira Abdusalomovna** - Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi; **Safarov Makhmadali Makhmadievich** - Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Worker of Science and Technology of Tajikistan, Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi.

Определение коэффициента набухания тернарных систем в процессе увлажнения паров воды

Determining the swelling coefficient of ternary systems in the process of water vapor humidification

Ключевые слова: коэффициент набухания, тернарная система, кремниевая кислота, многослойная углеродная нанотрубка, нанопорошок гидразина, масса и время.

Аннотация: В работе мы представили результаты опытного изучения коэффициента набухания тернарных систем (КК, МСУНТ и нанопорошка гидразина) до и после нагрева. Проведённое лабораторное исследования по поглощения влаги и определения коэффициента набухания в зависит от времени смесей тернарных систем по втором образце (таблицы 1-2) до и после нагревания, позволил нам узнать, что масса со временем

увеличивается, и это приводит к увеличению коэффициента набухания. Например, в течение 0,5 часов увлажнения исследуемых объектов и коэффициента набухания 5,5% и зависимость первого образца от второго 3,8% увеличивается. А также коэффициент набухания перед нагреванием 27,9% меньше, чем после нагревания.

Keywords: swelling coefficient, ternary system, silicic acid, multilayer carbon nanotube, hydrazine nanopowder, mass and time.

Abstract: In this paper, we presented the results of an experimental study of the swelling coefficient of ternary systems (K, MSUNT and hydrazine nanopowder) before and after heating. The conducted laboratory research on moisture absorption and determination of the swelling coefficient depends on the time of mixtures of ternary systems according to the second sample (Tables 1-2) before and after heating, allowed us to find out that the mass increases over time, and this leads to an increase in the swelling coefficient. For example, during 0.5 hours of humidification of the studied objects and the swelling coefficient of 5.5% and the dependence of the first sample on the second 3.8% increases. And also the swelling coefficient before heating is 27.9% less than after heating.

Актуальность темы заключается в том, что кремниевые кислоты и многослойные углеродные нанотрубки являются очень хорошими адсорбентами. Кремниевые кислоты служат сырьём для получения кварцевого стекла, различных адсорбентов - поглотителей других веществ [1, с. 671]. Кроме того, ее используют в химической отрасли для получения таких соединений, как оксид кремния и различные силикаты. Еще кремниевые кислоты используются как поглотители паров воды и газов, фильтры очистки воды и масел. Углеродная многослойная нанотрубка характеризует очень высокую твердость и коррозионную стойкость. Их можно использовать для изготовления торцевых уплотнительных колец для компрессоров, перекачивающих агрессивные жидкости и газы [2, с. 41]. Добавление в кремниевые кислоты и многослойную углеродную нанотрубку, нанопорошка гидразина придает материалу новые уникальные теплофизические, термодинамические, электрические и механические свойства.

Целью данной работы является исследование коэффициента набухания свойств тернарных систем, кремниевых кислот, многослойной углеродной нанотрубки и нанопорошка гидразина до нагревания (методом

сканирующего колориметра) и после нагревания и сравнения результатов измерения.

Для исследования коэффициента набухания свойства тернарных систем была использована экспериментальная установка, изобретённая профессором Сафаровым М.М. и его учениками. Установка состоит из 2-х частей: 1) цилиндрический сосуд, сетка (а), 2) секундомер и электронные весы (б), точность измерения которой равна 0,001 г. Диаметр сосуда около 5 см, высота 8 см диаметр сетки равен внутреннему диаметру сосуда, а площадь каждой сетки 1 мм². В начале опыта определяем вес сосуда с помощью весов. В сосуд наливаем воду, также определяем его вес. Исследуемые образцы взвешивали вместе с сеткой. Затем сетку с исследуемыми гранулами погружали в сосуд с водой и засекали секундомером время увлажнения. Опыт повторяли через каждые 30 минут [3-5].

Коэффициентом набухания называют объем в миллилитрах, занимаемый 1 г смесей тернарных систем, включая прилипшую слизь, после набухания в водном растворе в течение 0,5 ч.

В данной работе использован метод возвышения в среде увлажнения. Определяем коэффициент набухания по следующему выражению:

$$\gamma = \frac{m - m_0}{m_{\infty}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где m_0 - масса образца в начале измерения, m - масса образца после адсорбции и m_{∞} - масса насыщения исследуемого вещества. Экспериментальные данные приведены в таблице 1.

Таблица 1. Экспериментальные данные по изменению массы тернарных систем в двух образцах до нагревания

Время t (час)	Масса m , (г)							
	Образец №1 до нагрева				Образец №1 после нагрева			
	0,2	0,4	0,6	0,8	0,2	0,4	0,6	0,8
0,5	0,228	0,425	0,626	0,831	0,243	0,472	0,654	0,835
1,0	0,236	0,438	0,635	0,84	0,266	0,484	0,675	0,846
1,5	0,247	0,448	0,646	0,849	0,285	0,492	0,695	0,857

2,0	0,254	0,454	0,655	0,855	0,288	0,5	0,7	0,868
2,5	0,261	0,46	0,659	0,857	0,289	0,503	0,701	0,871
3,0	0,265	0,462	0,661	0,859	0,289	0,506	0,702	0,872
3,5	0,265	0,462	0,661	0,859	0,289	0,506	0,702	0,872

Образец №2- (69,06% H_2SiO_3 +26,62% N_2H_4 +3,32%МСУНТ).

Из таблиц 1 видно, что масса тернарных систем при поглощении влаги увеличивается. Ещё из этой таблицы можно сделать вывод, что поглощение влаги до нагревания тернарных систем меньше, чем поглощение влаги после нагреваний этой системы. Кроме того, можно сказать, что до нагревания в первом образце до 2 часов идёт процесс поглощения влаги воды, начиная с 2,5 часов, смеси тернарных систем станут насыщенными. После нагревания тернарных систем в поглощение влаги воды намного выше, чем до нагревания.

Таблица 2. Коэффициент набухания при увлажнении смесей тернарных систем КК, МСУНТ и нанопорошка гидразина (при концентрации 69,06% H_2SiO_3 +26,62% N_2H_4 +3,32%МСУНТ) до и после нагревания

Время	Коэффициент набухания γ , %							
	Образец №1				Образец №2			
t (час)	0, 2	0, 4	0, 6	0, 8	0, 2	0, 4	0, 6	0, 8
0,5	10,73	5,43	3,95	3,62	14,88	14,23	7,69	4,01
1	4,07	2,83	1,37	1,05	7,96	2,37	2,99	1,26
1,5	4,21	2,17	1,67	1,05	6,57	1,58	2,85	1,26
2	2,68	1,30	1,37	0,70	1,04	1,58	0,71	1,26
2,5	2,68	1,30	0,61	0,23	0,35	0,59	0,14	0,34
3	1,53	0,43	0,30	0,23	0,00	0,59	0,14	0,11
3,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Как видно, из таблицы 2 коэффициент набухания изменяется каждые полчаса, т.е. со временем коэффициент набухания уменьшается. Самые большие значения коэффициента набухания встречается в первом 0,5 часов. Это означает, что в начале 0,5 часов смесей тернарных систем поглощает больше влаги, чем в остальном времени коэффициент набухания уменьшается по линейному закону. В 3,5 часов смесей тернарных систем достигают линия насыщения.

На основе данных таблицы 2, построим график зависимости коэффициента набухания изучаемых образцов от времени увлажнения t .

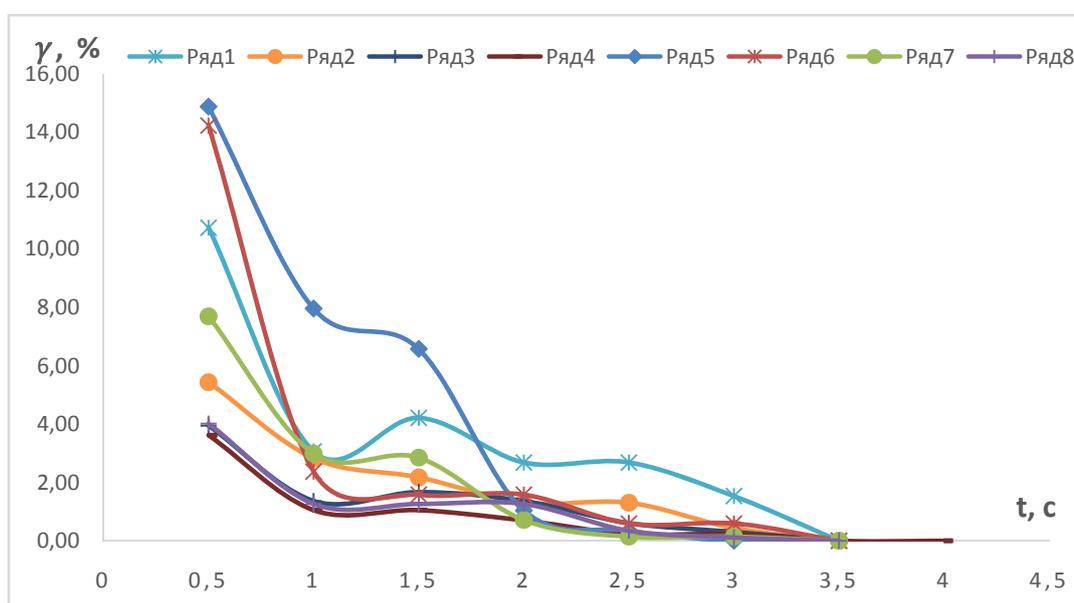


Рис. 1. Зависимости коэффициент набухания исследуемых тернарных системы от времени. Ряд 1- (при массе 0,2 г, до нагрева); ряд 2- (при массе 0,4 г, до нагрева); ряд 3- (при массе 0,6 г, до нагрева); ряд 4- (при массе 0,8 г, до нагрева); ряд 5- (при массе 0,2 г, после нагрева); ряд 6- (при массе 0,4 г, после нагрева); ряд 7- (при массе 0,6г, после нагрева); ряд 8- (при массе 0,8 г, после нагрева).

Из таблицы 2 и график 1 видно, что коэффициент набухания тернарных систем при массой 0,2 г до нагревания на 27,9% меньше, чем после нагревания. Как видно из графика в обоях случаях (до и после нагрева) с увеличением массы исследоваемых систем коэффициент набухания

уменьшается. Такого рода изменения графика является следствием изменения массы исследования смесей тернарных систем.

Список литературы

1. **Химическая** энциклопедия/ Редкол.: Кунунянс И.Л. и др...- М.: советская энциклопедия. - 1990.- Т. 2. – 671 С.

2. **Томишко М.** Многослойные углеродные нанотрубки и их применение: статья. / О. В. Демичева, А. М. Алексеев, А. Г. Томишко, Л. Л. Клинова, О. Е. Фетисова.- Москва. Рос. хим. ж. ЛП, №5,-, ул. НИФХИ им. Л.Я. Карпова. - 2008.- 41 с .

3. **Сафаров М.М.** Адсорбционные свойства катализатора на основе гранулированной пористой окиси алюминия. / М.М.Сафаров, А.Г. Мирзомамадов, С.С. Абдуназаров, М.А. Зарипова // Сборник тезисов докладов научной конференции «Актуальные проблемы современной науки» МИСиС. – Душанбе. - 2015. –С. 79-80.

4. **Холиков М.М.** Платинный катализатор для нейтрализации выхлопных газов ДВС и расчет коэффициента адсорбции и массоотдачи / Холиков М.М., Сафаров М.М., Джураев Д.С. // Материалы Международной научной конференции на тему «Масъалаҳои муосири математика ва методикаи таълими он» бахшида ба 25 – солагии Конституцияи Ҷумҳурии Тоҷикистон ва 80 – солагии доктори илмҳои педагогӣ, профессор Шарифзода Ҷумъа Шариф (г. Бохтар, 18-19 октябри соли 2019).-С. 163-166.

5. **Сафаров М.М.,** Джураев Д.С., Холиков М.М., Тагоев С.А., Ризоев С.Г., Зарипова М.А., Мирзомамадов А.Г., Норов З.Ю., Абдуназаров С.С., Махмадиев Б.М., Тиллоева Т.Р. Способ и устройства для определения коэффициента адсорбции ферромагнетных наночастиц в зависимости от температуры при атмосферном давлении Патент Республики Таджикистан № ТҶ 824, 2016.-7 с.

Давлатшоев С.К., Сафаров М.М.
Davlatshoev S.K., Safarov M.M.

Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАНТ,
г. Душанбе

Таджикский технический университет им. ак. М.С. Осими, г. Душанбе
Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology, NAST, Dushanbe
Tajik Technical University named after ac. M.S. Osimi, Dushanbe

Давлатшоев Саломат Каноатшоевич – к.т.н. заведующий лаборатории «Энергетика, ресурсо – и энергосбережения» Института водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАНТ; **Сафаров Махмадали Махмадиевич** - д.т.н., профессор, Таджикский технический университет им. ак. М.С. Осими.

Davlatshoev Salomat Kanoatshoevich - Ph.D. head of the laboratory "Energy, resource - and energy saving" Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology NAST; **Safarov Makhmadali Makhmadievich** - Doctor of Technical Sciences, Professor, Tajik Technical University named after ac. M.S. Osimi.

Кондуктометрический метод контроля гидрогеохимического режима водорастворимого основания плотины

Conduct metric method for monitoring the hydro geochemical regime of the water-soluble dam base

Ключевые слова: кондуктометр; каменная соль; гидрогеохимический режим; погружной зонд

Аннотация: Рассмотрено разработка кондуктометра для контроля гидрогеохимического режима основания плотины на водорастворимых породах.

Key words: conduct meter; rock salt; hydro geochemical regime; submersible probe

Abstract: The development of a conduct meter for monitoring the hydro geochemical regime of the foundation of a dam on water-soluble rocks is considered.

Имеется достаточно большой опыт строительства плотин на водорастворимых основаниях (каменная соль, гипс, ангидрид, известняки) [1]. Значительные аварии на гидротехнических сооружениях связаны с разрушением или осадкой оснований из-за возникновения неконтролируемой фильтрации, развития суффозионных процессов и образования пустот.

Плотина Рогунской ГЭС является уникальным сооружением, в основании которой залегает пласт каменной соли. Анализ строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений на водорастворимых основаниях показывает, что отсутствие мониторинга и надлежащих защитных мероприятий может привести к нарушениям нормальной эксплуатации.

Рогунская ГЭС строится в сложнейших условиях в инженерно-геологическом плане: узкое горное ущелье, высокая сейсмичность, непрочные и рыхлые горные породы, высока опасность оползней, камнепадов и селей. Но главная опасность – водорастворимое основание [2 – 3]. Под основанием плотины находится Ионахшский тектонический разлом, который заполнен каменной солью. В таких условиях ГЭС никогда не строили.

Актуальность вышеперечисленных задач заключается в обосновании выбора метода контроля за состоянием гидрогеохимического режима основания плотины Рогунской ГЭС, разработке средства измерений и на его основе – информационно-измерительной системы мониторинга водорастворимого основания плотины для прогнозирования и предотвращения ЧС.

На основании литературных исследований [4, 5] и проведённых экспериментов был выбран кондуктометрический метод измерения концентрации подземных вод.

Из [6] и результатов исследования электрофизических свойств (ЭФС) раствора каменной соли следует, что при измерении больших значений удельной электрической проводимости (УЭП), как в случае больших концентраций соли, эффективно использовать трансформаторный кондуктометр.

Особенностью бесконтактных НЧ-кондуктометров является отсутствие гальванического контакта электродов ячейки с анализируемой средой, что позволяет контролировать едкие, агрессивные и абразивные растворы, а также жидкости, склонные к налипанию на электроды датчика. Благодаря

этому исключается отравление электродов, катализ материалом электродов реакций в растворе и другие побочные процессы.

Схема кондуктометра с жидкостным витком показана на рис. 1.

Труба из диэлектрика образует замкнутый виток, который заполнен циркулирующей анализируемой жидкостью. Снаружи по краям трубки намотаны обмотки двух трансформаторов Tr_1 и Tr_2 . Первичная обмотка трансформатора Tr_1 питается переменным напряжением U . Замкнутый жидкостной виток, образованный раствором электролита в трубе, выполняет функцию вторичной обмотки трансформатора Tr_1 и первичной – для трансформатора Tr_2 .

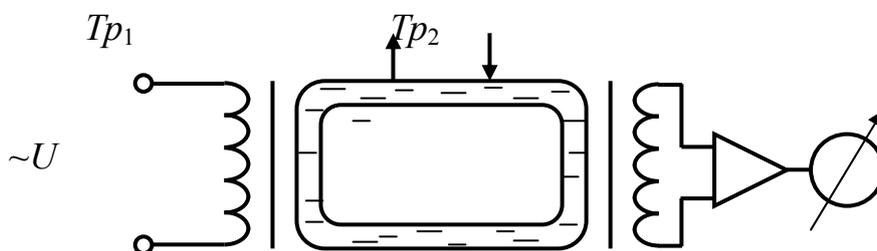


Рис. 1. Схема кондуктометра с жидкостным витком.

В результате электромагнитного взаимодействия в жидкостном витке индуцируется ЭДС

$$E_p = \frac{n_2}{n_1}, \quad (1)$$

где n_1 и n_2 – число витков обмоток трансформатора Tr_1 и Tr_2 соответственно (обычно $n_2 = 1$).

Сила тока, протекающего в жидкостном витке, равна

$$I = \frac{E_p}{R} = \frac{E_p}{A} \chi = U \frac{n_2}{An_1} \chi, \quad (2)$$

где R – электрическое сопротивление жидкостного витка.

По полученным результатам с целью осуществления оперативного контроля за гидрогеохимическим режимом (изменения минерализации грунтовых вод) основания плотины Рогунской ГЭС сотрудниками ООО

"NELT" и ООО "Гидроспецпроект" разработан и изготовлен опытный вариант экспресс – кондуктометра «КАЛЬМАР» (рис. 2).



Рис. 2. Кондуктометр – концентратомер «КАЛЬМАР».

Кондуктометр состоит из двух частей: погружного зонда и регистратора, служащего для отображения и сохранения результатов измерений. Погружной зонд связан с регистрирующим устройством 4-х жильным кабелем и может быть удален при необходимости на расстояние 200 м.

Кондуктометр «КАЛЬМАР» содержит тороидальный сенсор, который не имеет электродов [10]. Измерение электропроводности происходит следующим образом (рис. 3). В возбуждающем тороиде генерируется переменный синусоидальный магнитный поток с помощью высокостабильного генератора синуса и усилителя мощности. Если внутрь тороида попадает замкнутая проводящая среда (раствор NaCl), то в эту среду индуцируется (наводится) переменный ток. Этот ток охватывает оба тороида – и возбуждающий, и чувствительный. Чувствительный тороид работает в режиме трансформатора тока. Его выход пропорционален току, текущему в жидкостном витке. В общем случае имеется общий фазовый сдвиг φ между возбужденным и принятым сигналом. Квадратурный детектор выделяет

сигнал пропорциональный проводимости $\sin\phi$ и $\cos\phi$, и выводит их на экран регистратора.

Для получения концентрации в граммах на литр, сигнал $\cos\phi$, вместе с текущей температурой подставляется в таблицу концентрации, размещенной в ПЗУ (постоянном запоминающем устройстве) регистратора. Истинное значение концентрации вместе с температурой отображаются на дисплее регистратора.

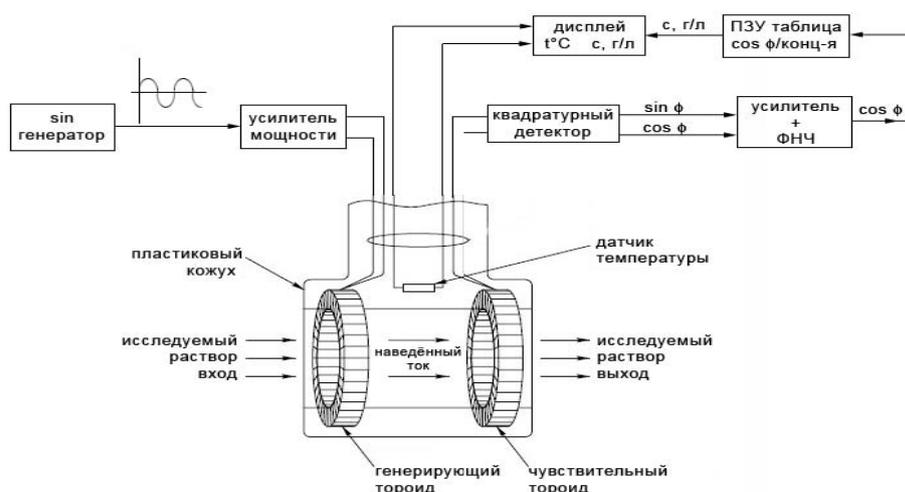


Рис. 3. Принципиальная схема работы кондуктометр «КАЛЬМАР».

Список литературы

1. **Гарелина С.А., Давлатшоев С.К., Латышенко К.П.** Повышение безопасности гидротехнических сооружений. Часть 1. На примере Рогунской ГЭС на реке Вахш. – Химки: АГЗ МЧС России, 2021. – 159 с.
2. **Исследования ТЭО** Проекта строительства Рогунской ГЭС. ТОМ 3: Инженерия и проектирование. ОАХК «БАРКИ ТОЧИК», 2014. – 122 с.
3. **Исследования ТЭО** Проекта строительства Рогунской ГЭС. Геологические исследования Правого берега – 2012. ОАХК «БАРКИ ТОЧИК», 2012. – 37 с.
4. **Латышенко К.П.** Метрология и измерительная техника. Микропроцессорные анализаторы жидкости / К.П. Латышенко, Б.С. Первухин. – М.: Юрайт, 2018. – 203 с.

5. **Латышенко К.П.**, Первухин Б.С., Фатеев Д.Е. Моделирование многообмоточных трансформаторных кондуктометров // Приборы, № 1 (115), 2010. – С. 49 – 55.

6. **Давлатшоев С.К.**, Сафаров М.М. Кондуктометрический способ и аппаратура измерения уровня минерализации в пьезометрических сетях / С.К. Давлатшоев, М.М. Сафаров // Вестник Казанского технологического университета, 2017. – № 18. Т. 20. – С. 45 – 52.

7. **Сафаров М.М.**, Давлатшоев С.К. Исследование концентрации подземных вод экспресс-кондуктометрическим методом. Материалы V Межд. Науч.-техн. конф. Студентов, молодых учёных и спец. «Энергосбережение и эффективность в технических системах». 2018. С. 362-363.

8. **Давлатшоев С.К.** Математическая модель функционирования кондуктометра «КАЛЬМАР». Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук, Душанбе, "Сино", №1/2, 2017, С. 83 – 86.

**Махмадали Махмадиевич Сафаров¹, Мухамадхуджа Ахмедхуджаевич
Абдуллоев², Масрур Мирзохонович Гуломов³, Хикматулло
Абдухоликович Зоиров⁴, Парвиз Махмадалиевич Сафаров⁴
Mahmadali M. Safarov¹, Muhamadkhudja A. Abdulloev², Masrur M.
Gulomov³, Hikmatullo A. Zoirov⁴, Parviz M. Safarov⁴**

¹Таджикский технический университет имени акад. М.С. Осими, Душанбе, Таджикистан; ²Политехнический институт ТТУ имени акад. М.С. Осими, Чкаловск, Таджикистан; ³Таджикский государственный педагогический университет им. С. Айни, Душанбе, Таджикистан;

⁴Душанбинский тепло-электроцентр-2, Душанбе, Таджикистан

¹Tajik technical university by named akad. M.S. Osimi, Dushanbe, Tajikistan;

²Polytechnic institute Tajik technical university by named akad. M.S. Osimi, Chkalovsk, Tajikistan; ³Tajik developments pedagogical university by named S. Aini, Dushanbe, Tajikistan; ⁴Dushanbe combined heat and power plant-2,

Dushanbe, Tajikistan

Сафаров Махмадали Махмадиевич - д.т.н., профессор кафедры “Теплотехника и теплоэнергетика” ТТУ имени акад. М.С. Осими, г. Душанбе; **Абдуллоев Мухаммадхуджа Ахмадхуджаевич** – к.т.н., зав. кафедрой “Электроснабжение” ГИТ, г. Чкаловск; **Гуломов Масрур Мирзохонович** – к.т.н., и.о. доцента кафедры “Общая физика” ТГПУ имени С. Айни, г. Душанбе; **Зоиров Хикматулло Абдухоликович** – к.т.н., заместитель начальника котлотурбинного цеха ДТЭЦ-2, г. Душанбе; **Сафаров Парвиз Махмадалиевич** – магистр ИЭТ, ДТЭЦ-2, г. Душанбе

Процесс седиментации и определение размеров наночастиц

Process sedimentation and sizing of nanoparticles

Ключевые слова: седиментация, теплоноситель, этиленгликоль, вода, скорость, фракция нанопорошка.

Keywords: sedimentation, heat carrier, ethylene glycol, water, speed, nanopowder fraction.

Аннотация: В статье приводятся результаты седиментационного анализа наночастиц и влияние их на изменение физико-химических свойств теплоносителей (водного раствора этиленгликоля). Обработка результатов показывает, что при прохождении седиментации наночастиц в исследуемых растворах, можно определить скорость его падения и их размеры. Общая относительная погрешность измерения скорости падения наночастиц определяется в пределе 2,3% при доверительной вероятности 0,95. На основе данных по размерам и скорости наночастиц получены статические уравнения или уравнения регрессии.

Abstract: The article presents the results of sedimentation analysis of nanoparticles and their influence on the change in the physicochemical properties of heat carriers (aqueous solution of ethylene glycol). The processing of the results shows that during the passage of sedimentation of nanoparticles in the solutions under study, it is possible to determine the rate of its fall and their sizes. The total relative error in measuring the rate of falling of nanoparticles is determined in the limit of 2.3% with a confidence level of 0.95. Based on the data on the size and velocity of nano-particles, static equations or regression equations are obtained.

Частицы упорядоченного строения размером 1...5 нм содержат до 10^3 атомов (нанокластеры или нанокристаллы). Наночастицы диаметром 5 - 100 нм состоят из $10^3...10^6$ атомов. Такая классификация, однако, верна только для изотропных (сферических) частиц.

Структуры нитевидные и пластинчатые могут содержать гораздо больше атомов и иметь один или два линейных размера, превышающих граничные значения. При этом их свойства остаются характерными в нанокристаллическом состоянии для вещества. Хотя наночастица имеет сложное строение, в качестве характеристики рассматривают не ее линейный размер, а размер ее структуры. Подобные частицы называют, как правило, наноструктурами. Линейные размеры могут существенно превышать 100 нм.

Этиленгликоль широко применяется в химической и фармацевтической текстильной и электротехнической, в автомобильной и авиационной промышленности. Водные растворы этиленгликоля (незамерзающие жидкости) кристаллизуются (замерзают) при достаточно низких температурах, поэтому очень широко применяются в качестве теплоносителя (антифриза, хладагента) в автономных отопительных системах и в системах промышленного кондиционирования общественных зданий и спортивных сооружений, различных производств, где технологически требуется поддержание в помещениях необходимой низкой температуры.

В некоторых случаях возможен и целесообразен альтернативный подход к составлению уравнений тепловых балансов не в виде разностных соотношений, а в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений для твердотельных структур:

$$C_i \frac{dT_i}{dt} + \sum_{j=1}^M q_{ij} (T_i - T_j) + q_{ic} (T_i - T_c) = Q_i, i=1, \dots, N \quad (1)$$

Система таких дифференциальных уравнений соответствует разностному алгоритму (1), и их удобно использовать для численных расчетов при сравнительно малом числе элементарных объемов (порядка нескольких единиц и десятков), а также для проведения аналитических оценок теплового состояния рассматриваемых структур. Вместе с тем внутри рассматриваемых наноструктур учитывается теплообмен только теплопроводностью (кондукцией). Наноструктуры состоят из наночастиц (молекул, ионов, атомов). Наночастицы находятся в непрерывном движении, и между ними существуют силы взаимного притяжения и отталкивания. Эти силы вызывают колебания наночастиц около их средних положений, причем амплитуды колебаний являются мерой температуры и растут при ее повышении.

Рассмотрим процесс оседания наночастиц в вертикальной емкости, заполненной жидкостью. Движение твердой наночастицы будет свободным или нет, зависит от разности между силой тяжести частицы и архимедовой силой в условиях гравитации [1]:

$$F = (\rho - \rho_0)gV = m(1 - \rho_0 / \rho)g \quad (2)$$

где: ρ и ρ_0 плотности частицы и дисперсионной среды; V – объем частицы; m - масса частицы; g - ускорение свободного падения. При $\rho > \rho_0$ частица движется вниз (седиментация), а при $\rho < \rho_0$ - вверх (флотация). Следует отметить, что сила F независима от формы частицы и ее положения в пространстве. На частицу также действует сила сопротивления со стороны жидкости. Критериальная форма описания процесса осаждения частицы, имеющей шарообразный вид, в неподвижной среде возможна с применением критерия подобия Архимеда A_r , Лященко L_y и Рейнольдса Re [2-5]. В условиях, когда мешалка остановлена, а концентрация (объемная) твердых частиц ниже 30 % [75], происходит свободное движение (оседание) твердых частиц, и этот режим осаждения можно назвать ламинарным ($Re \leq 0,2$).

Наибольший диаметр частиц, оседание которых происходит по закону Стокса, с учетом критерия Рейнольдса при $Re = 2$ (предельное значение в ламинарном режиме) определяется по формуле:

$$d_{\max} = 1.56^3 \sqrt{\frac{\mu^2}{\rho_0(\rho - \rho_0)}} \quad (3)$$

Закон Стокса имеет предел применимости: при определенных минимальных размерах частиц он не срабатывает и этот предел по критерию Рейнольдса $Re \approx 10^{-4}$. При данном значении критерия Рейнольдса становится ощутимым влияние теплового движения молекул среды на скорость оседания мелких частиц. При этом размеры диаметров осаждающихся частиц соизмеримы со средней длиной пробега молекул дисперсионной среды. В этих условиях скорость оседания частиц приобретает значения меньше, чем по расчету согласно уравнению Стокса [6]:

$$W_{oc} = \frac{d^2(\rho - \rho_0)}{18\mu}, \quad (4)$$

Диаметры (форма наночастиц принята как шарообразная) частиц (после обработки в дробилке и просеивания сквозь сито 250 мкм) имеют диапазон размеров 0-250 мкм, плотность наночастиц 800 кг/м^3 , вязкость жидкости $\mu=0,00114 \text{ Па}\cdot\text{с}$. Минимальный размер наночастиц, осаждающихся по закону Стокса, определен по результатам седиментационного анализа и равен 16 мкм, а максимальный размер равен 140 мкм, что соответствует данным седиментационного анализа (п. 2.3). W_{oc} – приведенный расчет скорости свободного оседания частиц, когда между осаждающимися твердыми частицами отсутствует взаимовлияние на движение друг друга. В условиях, когда массовая средняя концентрация твердых частиц имеет значения больше 30% жидкой среды, осаждение частиц происходит в стесненных условиях, т.е. между частицами происходят соударение и трение, и W_{cm} – скорость стесненного осаждения меньше, чем W_{oc} . Учеными выведены различные уравнения эмпирического характера применительно к расчетам скорости оседания частиц в условиях стесненного движения, однако, на

практике обычно значение скорости приравнивают к половине значения скорости оседания частиц в условиях свободного гравитационного движения [7]. Учет коэффициента формы частицы $\varphi < 1$ включает в себя умножение его на скорость свободного оседания, вычисленную по формуле (4).

С гидродинамической точки зрения [6,7] стесненное осаждение аналогично определенному состоянию взвешенного (псевдооживленного) слоя твердых частиц, и условие равномерного осаждения частиц в неподвижной среде идентично условию витания частиц в восходящем потоке. Следовательно, закономерности стесненного осаждения удобно изучать при движении восходящего потока дисперсионной среды через слой взвешенных в нем частиц.

Таблица 1. Скорости свободного и стесненного осаждения твердых частиц фосфорита (контрольного образца) в вертикальной емкости с жидкостью.

$d, 10^{-6} \text{ м}$	Скорость свободного осаждения, $W_{св}$, м/сек	Скорость стесненного осаждения, $W_{ст}$, м/сек
16	0,0002	0,0001
100	0,0086	0,0042
140	0,0168	0,0084

Список литературы

1. **Бобоназаров М.** Физико-химические особенности комплексной переработки фосфоритов Таджикистана. / Махмади Бобоназаров // Дисс. ...к.т.н., Душанбе, 2016, -123 с.
2. **Konyushenko E.N.,** Kazantseva N.E., Stejskal J., Trchová M., Kovářová J., Sapurina I., Tomishko M.M., Demicheva O.V., Prokeš J. GMMM, 2008, v. 320, № 3+4, -pp. 231-240.
3. **Томишко М.М.** Матер. 7^{ой} Всерос. конф. «Физикохимия ультрадисперсных (нано-) систем», / О.В.Демичева, Е.И. Шклярова, И.А.

Чмутин, А.М. Алексеев, Л.Л. Клинова // Ершово, Московская обл., 22-24 ноября 2005, -С. 89.

4. **Томишко М.М.**, Тез. докл. конференции «Нанотехнологии – производству -2006» / О.В. Демичева, В.Д. Данилов, С.А. Жукова, Л.Л. Клинова, А.М. Алексеев // 29-30 ноября 2006 г., Фрязино,-С. 183-184.

5. **Пул Ч.**, Нанотехнологии. М.: / Оуэнс Ф. // Техносфера, 2004,-С.328.

6. **Денисов Ю.Н.** Основные процессы и аппараты химической технологии. Ч. 2: Типовые процессы и аппараты химической технологии: курс лекций / Ю. Денисов, Н.А. Орлова, Е.А. Пазников. // Алт. гос. техн. ун-т, БТИ.- Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. -156 с.

7. **Брагинский Л.Н.** Перемешивание в жидких средах, физические основы и инженерные методы расчета / Л.Н. Брагинский, В.И. Бегачев, В.М. Барабаш // – Л.: Химия, -1984. -336 с.

**Махмадали Махмадиевич Сафаров¹, Умарзода Шарифмуроди Умар²,
Неъматов Г.Н.³, Умарализода Мансури Умарали³
Mahmadali M. Safarov¹, Umarzoda Sh. Umar², Golib N. Nematov³,
Umaralizoda M. Umarili³**

¹Таджикский технический университет имени акад. М.С. Осими, Душанбе, Таджикистан; ²Таджикский государственный педагогический университет им. С. Айни, Душанбе, Таджикистан; ³Таджикский государственный педагогический университет им. С. Айни, Душанбе, Таджикистан

¹Tajik technical university by named akad. M.S. Osimi, Dushanbe, Tajikistan;

²Tajik developments pedagogical university by named S. Aini, Dushanbe,

Tajikistan; ³Tajik developments pedagogical university by named S. Aini, Dushanbe, Tajikistan

Сафаров Махмадали Махмадиевич - д.т.н., профессор кафедры “Теплотехника и теплоэнергетика” ТТУ имени акад. М.С. Осими, г. Душанбе; **Умарзода Шарифмуроди Умар** – стр. преп. кафедры “Информатика” ТГПУ имени С. Айни, г. Душанбе; **Неъматов Голиб Нуралиевич** – к.т.н. кафедры “Информатика” ТГПУ имени С. Айни, г. Душанбе; **Умарализода Мансури Умарали** - стр. преп. кафедры “Информатика” ТГПУ имени С. Айни, г. Душанбе.

Safarov Makhmadali Makhmadievich - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of "Heat Engineering and Heat Power Engineering" of the TTU named after M.S. Osimi, Dushanbe; **Umarzoda Sharifmurodi Umar** - St. Rev. Department of "Informatics" TSPU named after S. Aini, Dushanbe; **Nematov Golib Nuralievich** - Candidate of Technical Sciences of the Department of "Informatics" TSPU named after S. Aini, Dushanbe; **Umaralizoda Mansuri Umarali** - St. Rev. Department of "Informatics" TSPU named after S. Aini, Dushanbe.

Теплофизические свойства сплавов с эффектами памяти “форм” на основе ванадия

Heat capacity, heat conductivity of alloys with memory effects “forms” based on vanadium

Ключевые слова: фуллерены C₆₀ и C₇₀, ванадий, теплоемкость, концентрация, наноразмерный порошок.

Аннотация: В статье приводятся результаты экспериментального исследования теплоемкости сплавов на основе ванадия в зависимости от температуры и концентрации фуллеренов. Результаты исследования показали, что добавки фуллеренов C₆₀ и C₇₀ в ванадий увеличивают их

теплоемкость. Общая относительная погрешность измерения удельной теплоемкости составляет 3,3% соответственно при доверительной вероятности 0,95. На основе данных по теплоемкости сплавов и фуллеренов C_{60} и C_{70} с эффектами памяти “форм” получены эмпирические уравнения.

Keywords: fullerenes C_{60} and C_{70} , vanadium, heat capacity, heat conductivity, concentration, nanosized powder.

Abstract: The article presents the results of an experimental study of the heat capacity of alloys based on vanadium depending on the temperature and concentration of fullerenes. The results of the study showed that the addition of fullerenes C_{60} and C_{70} to vanadium increases their heat capacity. The total relative error in measuring the specific heat is 3.3%, respectively, with a confidence level of 0,95. Empirical equations have been obtained on the basis of data on the heat capacity of alloys and fullerenes C_{60} and C_{70} with “shape” memory effects.

Объект исследования – сплавы на основе титана, молибдена, ванадия и др. с учетом их изменения концентрации нанонаполнителей фуллеренов C_{60} и C_{70} . Образцы в виде таблеток и цилиндр, имеющий внешний диаметр-15 мм, высотой 5 и 10 мм. Образцы до проведения опытов были изготовлены методом прокаливания с определенной концентрацией фуллеренов C_{60} и C_{70} . Средний размер фракции для фуллеренов составляет 50 нм.

Разработка новой высокоэффективной техники, технологии и материалов с заранее заданными свойствами для различных отраслей народного хозяйства, в том числе получение их, как и в целом для ускорения научно-технического прогресса, невозможна без знания свойств веществ и материалов [1-3].

Исследование теплофизических свойств технически важных композиционных материалов (и их сплавов) в твердой фазе в широком интервале температур имеет большое научное и прикладное значение.

Получение экспериментальных значений теплоемкости сплавов с эффектами памяти “форм” на основе ванадия как в чистом виде, так и содержащей различное количество активных металлов и фуллеренов в кристаллическом и аморфном состоянии в интервале температур 298 К до температуры плавления, а также выявление зависимости теплофизических свойств сплавов на основе ванадия от концентрации содержащегося металла

и рода углеродного наполнителя (C_{60} и C_{70}) [4-6]. В работах авторами Абдулазизовым Т.А., Сативолдыевым А.С., Маметовой А.С. [2] составлены диаграммы состояния системы Ti-C,V-C и Mo-C. Авторы работ [2,3] доказали, что для этих металлов существуют карбидные соединения. Молибден с углеродом образует два карбидных соединения Mo_2C и MoC , каждое из которых имеет две кристаллические модификации: низкотемпературную “ α ”, высокотемпературную “ β ” [3].

Методология и методы исследования – для выполнения диссертационной работы использовали метод монотонного разогрева (теплоемкость - установка Е.С. Платунова) при различных температурах и обработке экспериментальных данных (метод наименьших квадратов (компьютерная программа Excell и Сигма Plote).

Для измерения теплопроводности нами использованы методы монотонного разогрева, предложенные профессором Е.С. Платуновым и его учениками [6,7]. Методы монотонного теплового режима основываются на закономерностях приближенного анализа нелинейного уравнения теплопроводности. При этом под монотонным тепловым режимом понимается плавный разогрев (охлаждение) тела в широком диапазоне измерения температуры со слабопеременным полем скоростей внутри образца [6, 7]. Эти методы являются обобщением квазистационарных методов на случай переменных теплофизических параметров [$\lambda = \lambda(t); a = a(t); c\rho = c\rho(t)$] и скорости нагревания (охлаждения) $b = f(x, \tau)$. Они позволяют из одного опыта получить температурную зависимость исследуемого свойства и носят название динамических методов.

Метод монотонного разогрева используется для измерения теплопроводности, теплоемкости и температуропроводности жидкостей, растворов, твердых тел, сыпучих материалов и др. [6,7]. Установка для исследования методом монотонного разогрева и ее тепловая схема показаны в работе [7]. Медная ячейка с исследуемым образцом, пластина контактная и стержень монотонно разогреваются тепловым потоком, $Q(t)$ поступающим

от основания. Боковые поверхности стержня, медная ячейка с исследуемым образцом, пластины адиабатически изолированы. Стержень и пластина контактная изготовлены из меди, обладающей высокой теплопроводностью, поэтому перепады температур на них незначительны [6,7]. Для численных расчетов эффективности энергоустановки необходимо знать, что при составлении математической модели необходимо иметь значение теплопроводности, плотности и изобарную теплоемкость чистого жидкого изобутана при различных температурах и давлениях, а также с добавкой фуллеренов C_{60} и C_{70} .

Таблица 1. Теплофизические характеристики основных компонентов для получения сплавов для солнечных коллекторов (ванадий).

Т, К	Плотность, кг/м ³	Удельная теплоемкость, Дж/ (кг.К)	$\alpha \cdot 10^6$, м ² /с	Теплопроводность Вт/(м.К)
300	6100	481,1	10,4	30,5
400	6080	503,3	10,2	30,9
500	6078	518,2	10,1	31,8
600	6060	531,1	10,2	32,8
700	6030	543,6	10,4	34,1
800	6010	556,5	10,6	35,5

Коэффициент эффективности теплоносителей системы изобутан и фуллерены рассчитан следующей формулой:

$$K_{эфф} = \sqrt{C_p \rho \lambda}, \frac{Вт\sqrt{с}}{М^2К} \quad (1)$$

где, C_p - удельная теплоёмкость $\frac{Дж}{(кг К)}$; ρ - плотность, кг/м³; λ - теплопроводность, Вт/(м. К).

Результаты численных расчётов по коэффициенту активности исследуемых коллоидных растворов системы углеводородных жидкостей изобутана и фуллеренов C_{60} и C_{70} представлены в таблице 2.

Таблица 2. Значение изобарной теплоемкости (C_p , Дж/(кг·К)) паров изобутана при различных температурах и атмосфере давления.

T, K	298	420	460	500	540	580	630
C_p	1670	2236	2404	2561	2429	2854	3019

Как видно из таблицы 2, с повышением температуры (298-630) К удельная теплоемкость растет по линейному закону.

На рисунке 1, приведены корреляционные зависимости теплопроводности сплава с эффектами памяти системы ($Ti+C_{60}$) в интервале температуры (300-800) К в атмосфере воздуха подготовленных сплавов с инновационным целям, т.е. выявит влияние добавки фуллерена C_{60} на изменение теплоемкости и теплопроводности исследуемых сплавов на основе титана и получит корреляционные зависимостей.

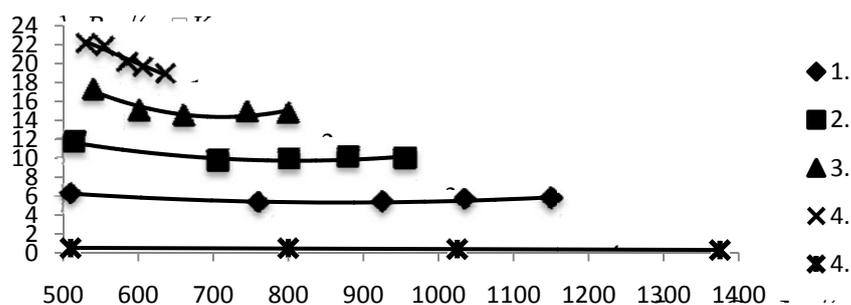


Рис. 1. Корреляция между эффективной теплопроводностью и теплоемкости для сплавов с наполнителем фуллерена ($Ti+C_{60}$) при температуре (300-800) К и атмосферном давлении ($p=0,101$) МПа. Образец №1-(100%Ti); Образец №2 -(75%Ti + 25% C_{60}); Образец №3-(50%Ti+50% C_{60}); Образец №4-(25%Ti+75% C_{60});Образец №5-(100% C_{60}); *-рассчет проведен по принципу аддитивности.

Как видно из этого графика для первого и пятого образца теплопроводность с повышением теплоемкости уменьшается по линейному закону (линии 1 и 5). Добавки некоторых концентраций фуллерен C_{60} приводит к другим закономерностям. Для образцов второй, третьей и

четвертой образцов изменение их теплопроводности от теплоемкости выполняется гиперболическому закону [34].

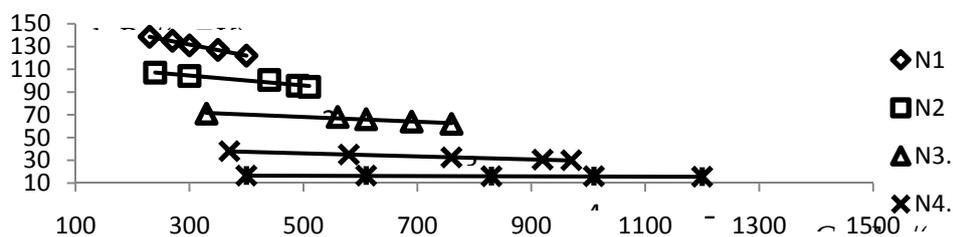


Рис. 2. Корреляция между эффективной теплопроводностью и теплоемкости для сплавов с наполнителем фуллерена (Mo+C₆₀) при температуре (300-800) К и атмосферном давлении (p=0,101) МПа. Образец №1-(100%Mo); Образец №2 -(75%Mo+ 25%C₆₀); Образец №3-(50%Mo+50%C₆₀); Образец №4-(25%Mo+75%C₆₀);Образец №5-(100 %C₆₀); *-рассчет проведено принципом аддитивности.

На рисунке 2, представлена графики зависимостей коэффициента эффективной теплопроводности двухкомпонентных сплавов системы (Mo+C₆₀) с эффектами памяти на основе молибдена с добавкой фуллерена C₆₀ в интервале температур 298 до 800 К в атмосфере воздуха. Как видно из рисунка 2, с повышением теплоемкости образцов теплопроводность изменяется по линейному закону (для всех образцов). Как показывает результаты экспериментальные исследование угол наклона корреляционные зависимостей прямо пропорционально к значением теплоемкостей. Причины такое изменение является в данном случае пониженные теплоемкости наполнителя фуллерена C₆₀. Для всех исследуемых образцов коэффициент температурная зависимость теплопроводности имеет положительных знак. Надо отметить, что при добавке в молибдене фуллерен C₆₀ изменится структура исследуемых сплавов, в связи с чем изменится угол наклона корреляционных зависимостей.

Список литературы

1. **Стормс Э.** Тугоплавкие карбиды / Э. Стормс // М.: Атомиздат, 1970. - 233 с.
2. **Абдулазизов Т.А.** О фазовом составе продуктов совместного электроискрового диспергирования титана со сплавом V-M в гептане. / Т.А. Абдулазизов, А.С. Сатыволдыев, А.С. Маметова. // Материалы 4 Международной научной конференции: “Вопросы физической и координационной химии”, посвященной памяти докторов химических наук, профессоров Якубова Х.М. и Юсуфова З.Н. Душанбе, 2019.- С. 41-45.
3. **Холлек Х.** Двойные и тройные карбидные и нитридные системы переходных металлов: Справочник. / Х. Холлек // - М.: Metallurgia, 1988. - 319 с.
4. **Сафаров М.М.** Взаимосвязь между тепло- и электропроводностью кремнесодержащих сплавов алюминия // Международная теплофизическая школа “Теплофизические измерения при контроле и управлении качеством”, Тамбов. - 2004. - С. 171-173.
5. **Зиновьев В.Е., Коршунов И.Г.** Теплопроводность и температуропроводность переходных металлов при высоких температурах / Обзор по теплофизическим свойствам веществ. Ч. 1: Обзор экспериментальных данных - М.: ИВТАН СССР. - 1978. № 4. - С. 121; Ч. 11: Особенности механизмов рассеяния электронов и фононов. - М.: ИВТ АН СССР. - 1979. - № 4. -119 с.
6. **Буравой С.Е., Платунов Е.С., Курепин В.В.** Перспективы исследования теплофизических свойств методами монотонного режима // Материалы 5 Международной теплофизической школы. 20 - 24 сентября 2004 г. Часть 1. Тамбов, Изд. ТГТУ. - С. 66-74.
7. **Теплофизические измерения и приборы** / Е.С. Платунов, С.Е. Буравой, В.В. Курепин, Г.С. Петров; Под общ. ред. Е.С. Платунова. - Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд., 1986.-256 с., М., 1978.-708 с.

Хина Б.Б.

Khina B.B.

Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси,
Белорусская государственная академия авиации, г. Минск
Physico-technical Institute, National Academy of Sciences of Belarus
Belorussian State Aviation Academy, Minsk

Хина Борис Борисович – д.ф.-м.н., доцент, главный научный сотрудник Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси; профессор кафедры естественных и общетехнических дисциплин Белорусской государственной академии авиации.

Khina Boris Borisovich – doctor of physical and mathematical sciences, Associate Professor, Principal Researcher at the Physico-technical Institute, National Academy of Sciences of Belarus; Professor at the Department of natural and general engineering sciences of the Belorussian State Aviation Academy.

Применение CALPHAD-подхода для расчета адиабатической температуры СВС в системе Ni-Al

The use of CALPHAD approach for calculating the adiabatic SHS temperature in the Ni-Al system

Ключевые слова: CALPHAD-подход; самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС); адиабатическая температура горения; интерметаллические соединения; система Ni-Al

Аннотация: CALPHAD-подход, учитывающий избыточную энтальпию смешения высокотемпературного бинарного расплава и нестехиометрических твердых фаз, применен для расчета адиабатической температуры горения при СВС интерметаллических соединений в системе Ni-Al.

Key words: CALPHAD approach; self-propagating high-temperature synthesis (SHS); adiabatic combustion temperature; intermetallic compounds; Ni-Al system

Abstract: The CALPHAD approach, which takes into account the excess enthalpy of mixing of the high-temperature binary melt and non-stoichiometric solid phases, is applied for calculating the adiabatic combustion temperature at SHS of intermetallic compounds in the Ni-Al system.

Самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) – эффективный метод получения многих современных материалов, включая наноструктурированные композиты. Для разработки технологий и

конструирования СВС-реакторов необходимо, прежде всего, оценить адиабатическую температуру СВС T_{ad} . Компьютерные программы, основанные на минимизации энергии Гиббса системы [1, 2], годятся только для стехиометрических веществ, в то время как многие соединения имеют широкую область гомогенности, где их энтальпия изменяется на 20–40%, что будет влиять на величину T_{ad} .

В данной работе для расчета зависимости T_{ad} от состава шихты использован CALPHAD-подход (CAL culation of PHAse Diagrams), учитывающий избыточную энтальпию смешения как высокотемпературного бинарного расплава, обычно присутствующего в волне СВС, так и нестехиометрических твердых фаз [3]. Для исследования выбрана имеющая практическое значение бинарная система Ni-Al, в которой имеется ряд интерметаллических соединений.

Величина T_{ad} определяется из условия баланса энтальпии системы:

$$x_{Ni}H_{Ni}^{fcc}(T_0) + (1 - x_{Ni})H_{Al}^{fcc}(T_0) = H_{pr}(T_{ad}), \quad (1)$$

где x_{Ni} – мольная доля никеля в шихте, T_0 – исходная температура, К, H_{Ni}^{fcc} и H_{Al}^{fcc} – энтальпия никеля и алюминия в стандартном состоянии с ГЦК (*fcc*) кристаллической решеткой, Дж/моль, H_{pr} – энтальпия продуктов при T_{ad} .

Термодинамические характеристики чистых элементов (Ni и Al) при разных температурах определяются по базе данных (БД) SGTE [4].

Поскольку для разных составов шихты фазовый состав продукта и содержание компонентов в высокотемпературных фазах будут различными, что влияет на величину $H_{pr}(T_{ad})$, необходимо одновременно с решением уравнения (1) выполнять расчет фрагмента диаграммы состояния Ni-Al с использованием CALPHAD-метода. Расчет основан на решении системы уравнений, описывающих термодинамическое равновесие фаз при данной температуре. Например, для контакта расплава L с твердым интерметаллидом NiAl имеем

$$\begin{aligned}\mu_{Al}^L(x_{Ni}^{(0)L}, T) &= \mu_{Al}^{NiAl}(x_{Ni}^{(0)NiAl}, T) \\ \mu_{Ni}^L(x_{Ni}^{(0)L}, T) &= \mu_{Ni}^{NiAl}(x_{Ni}^{(0)NiAl}, T)\end{aligned}\quad (2)$$

где μ_i^j – химический потенциал i -го компонента ($i \equiv Ni, Al$) в j -й фазе (в данном случае $j \equiv L, NiAl$), $x_{Ni}^{(0)j}$ – равновесное содержание Ni в j -й фазе.

Химические потенциалы компонентов бинарной системы в фазе j определяются по известным из термодинамики уравнениям

$$\mu_{Al}^j = G_{j,m} - x_{Ni} \frac{dG_{j,m}}{dx_{Ni}}, \quad \mu_{Ni}^j = G_{j,m} + (1 - x_{Ni}) \frac{dG_{j,m}}{dx_{Ni}}, \quad (3)$$

где $G_{j,m}$ – энергия Гиббса j -й фазы в расчете на 1 моль раствора (например, для фазы NiAl с мольным соотношением компонентов 1:1 – на состав Ni_{0.5}Al_{0.5}).

В рамках CALPHAD-подхода зависимость энергии Гиббса фазы G_j от состава и температуры определяется по соответствующей модели раствора.

В данной работе использована упрощенная термодинамическая модель [5], в которой фазы NiAl₃, Ni₂Al₃ и Ni₃Al считаются строго стехиометрическими, а расплав L , интерметаллид NiAl и твердый раствор на основе ГЦК-никеля (fcc -Ni) описываются как регулярные неупорядоченные растворы. В этой модели энергия Гиббса и энтальпия j -го раствора ($j \equiv L, NiAl, fcc$ -Ni) имеют вид

$$G_j = \sum_i x_i G_i^j + RT \sum_i x_i \ln x_i + H_{ex}^j, \quad (4)$$

$$H_i = \sum_i x_i H_i^j + H_{ex}^j, \quad (5)$$

где G_i^j и H_i^j – энергия Гиббса и энтальпия i -го компонента в j -ом состоянии (жидком или твердом с соответствующей кристаллической решеткой; данные имеются в БД SGTE [4]), H_{ex}^j – избыточная энтальпия смешения для j -й фазы.

Зависимость избыточной энтальпии смешения от состава фазы описывается в виде полинома Редлиха - Кистера - Муггиану:

$$H_{ex}^j = x_{Al}x_{Ni} \sum_n^n L_{Al,Ni}^j (x_{Al} - x_{Ni})^n, \quad n \geq 0, \quad (6)$$

где значения параметров ${}^nL_{Al,Ni}^j$ для всех растворов, а также формулы для энергии Гиббса стехиометрических фаз системы Ni-Al приведены в работе [5].

Результаты расчетов представлены на рис. 1. Поскольку СВС начинается выше температуры плавления алюминия, низкотемпературная часть диаграммы Ni-Al, включая фазу Ni_5Al_3 , не рассчитывалась.

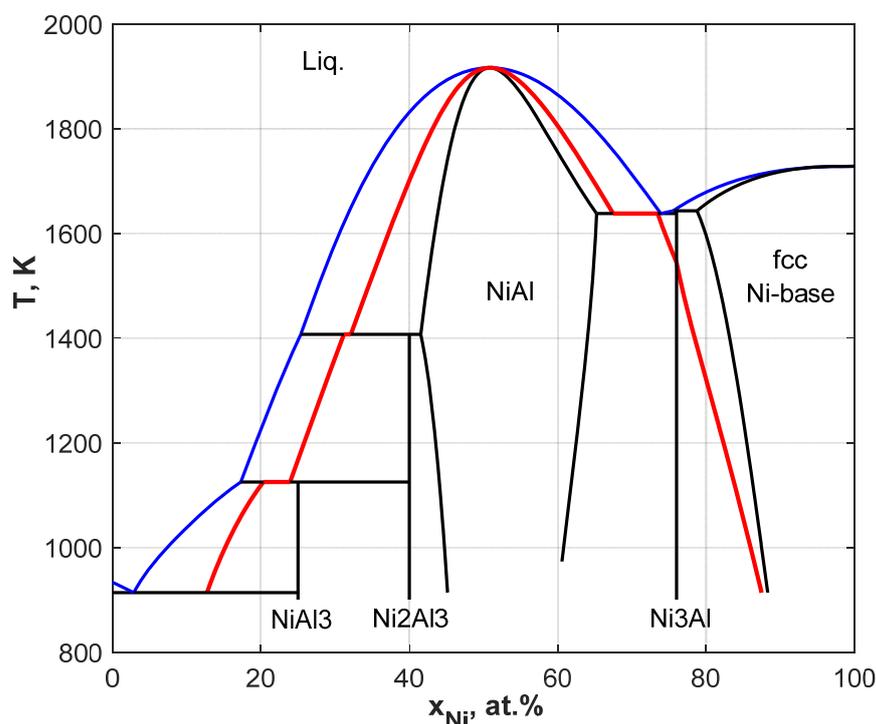


Рис. 1. Зависимость адиабатической температуры СВС от состава, наложенная на рассчитанную диаграмму состояния Ni-Al: красные линии – T_{ad} , синие – линии ликвидус, черные – линии солидус и твердофазных равновесий.

Как видно из рис. 1, во всех областях слева от фазы NiAl и справа от нее до линии перитектики NiAl–L–Ni₃Al линия T_{ad} проходит в двухфазной области между ликвидусом и солидусом. Таким образом, это является необходимым термодинамическим условием для протекания СВС в данной системе.

Список литературы

1. **Ватолин Н.А.** Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах / Н.А. Ватолин, Г.К. Моисеев, Б.Г. Трусов. – М.: Металлургия, 1994. – 352 с.
2. **Shiryaev A.** Thermodynamics of SHS processes: An advanced approach // International Journal of SHS. – 1995, Vol. 4. – P. 351 – 362.
3. **Lukas H.L.** Computational Thermodynamics: The Calphad Method / H.L. Lukas, S.G. Fries, B. Sundman. – Cambridge University Press, 2007. – 313 pp.
4. **Dinsdale A.T.** SGTE data for pure elements // Calphad. – 1991, Vol. 15. – P. 317 – 425.
5. **Miettinen J.** Thermodynamic description of the Cu-Al-Ni system at the Cu-Ni side // Calphad. – 2005, Vol. 29. – P. 40 – 48.

Abzar Mirzaliyev¹, Javid Safarov², Dirk Tuma^{3,*}, Rasim Bashirov¹

¹ Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan; ² University of Rostock, Rostock, Germany; ³ BAM Federal Institute for Materials Research and Testing, Berlin, Germany

Density and speed of sound of north Atlantic seawater

The majority of water on earth is seawater, a solution of salts of nearly constant composition dissolved in water. The middle temperature in the Earth surface is increasing at the result of Global Warming. Same time, the temperature of Oceans and other water reservoirs also is increasing. A most parts of north and south geographical pole of Earth is the pressed pure drinking water mostly in ice form, which is melting at the result of increasing of temperature and mixing with the seawater. The quality and properties of seawater also is changing. In this case, the analysis of Ocean waters, which have border with ice forming of water reservoirs, is actually. For scientific investigations and design of many natural and technical processes which have to do with seawater, it is of great importance to have a reliable base of thermo physical properties.

The present work therefore fills an essential data gap in this research field. We have experimentally analyzed the density $\rho(p_0, T, S)$ and speed of sound $u(p_0, T, S)$ of 18 North Atlantic Seawater from Norway border up to Canada at $T = (278.15$ to $343.15)$ K and at ambient pressure using an Anton Paar DSA 5000 M vibration tube densimeter and sound of speed analyzer. The obtained results were fitted to the polynomial equation of state. If the density and speed of sound values are available, to analyze the isobaric thermal expansivity α_p/K^{-1} using a standard thermodynamic deviation (eqn. 1) from temperature changing at constant ambient pressure and isentropic exponent κ_s of samples using the Laplace equation (eqn. 2):

$$\alpha_p = \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p, \quad (1)$$

$$\kappa_s = \frac{1}{\rho \cdot u^2}, \quad (2)$$

The difference of obtained values from IAPWS-95 water values [1] and new Seawater thermo physical properties [2-4] were analyzed.

References

1. **Wagner W.**, Pruß, A. The IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use, Journal of Physical Chemistry Reference Data 2002. 31, 387-535.

2. **Safarov J.**, Millero F.J., Feistel R., Heintz A. Hassel, E. Thermodynamic properties of standard seawater: extensions to high temperatures and pressures, Ocean Science 2009, 5, 235-246.

3. **Safarov J.**, Berndt S., Millero F.J., Feistel R., Heintz A., Hassel E. (p, ρ, T) properties of Seawater: Extensions to High Salinities, Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers 2012, 65, 146-156.

4. **Safarov J.**, Berndt S., Millero F.J., Feistel R., Heintz A., Hassel E. (p, ρ, T) properties of Seawater at Brackish Salinities: Extensions to High Temperatures and Pressures, Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers 2013, 78, 95-101.

**Махмадали Махмадиевич Сафаров¹, Кутосби Мирзоева², Матлаби
Джабборзода², Джурабой Файзалиевич Собиров³**
Mahmadali M. Safarov¹, Q. Mirzoeva², M. Jabborzoda², Juraboi F. Sobirov³

¹Таджикский технический университет имени акад. М.С.Осими, Душанбе,
Таджикистан

²Таджикский государственный педагогический университет им. С.Айни,
Душанбе, Таджикистан

³Бохтарский государственный университет им. Носири Хусрава, Бохтар,
Таджикистан

¹Tajik technical university by named akad. M.S.Osimi, Dushanbe, Tajikistan

²Tajik developments pedagogical university by named S.Aini,
Dushanbe, Tajikistan

³Bokhtar developments university by named N.Rhusrav, Bokhtar, Tajikistan

Сафаров Махмадали Махмадиевич - д.т.н., профессор кафедры “Тепло-техника и теплоэнергетика” ТТУ им. акад. М.С. Осими, г. Душанбе; **Мирзоева Кутосби** – стр. преп. кафедры “Общая физика” ТГПУ им. С. Айни, г. Душанбе; **Матлаби Джабборзода** – стр. преп. кафедры “Общая физика” ТГПУ им. С. Айни, г. Душанбе; **Собиров Джурабой Файзалиевич** - д.т.н., и.о. профессор кафедры “Общая физика” БГУ им. Носири Хусрава, г. Бохтар.

Mahmadali Makhmadievich Safarov - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of "Heat Engineering and Heat Power Engineering" of M.S. Akad. Osimi, Dushanbe; **Mirzoeva Kutosbi** - St. Rev. Department of "General Physics" TSPU named after S. Aini, Dushanbe; **Matlabi Jabborzoda** - St.Rev. Department of "General Physics" TSPU named after S. Aini, Dushanbe; **Sobirov Juraboy Fayzalievich** - Doctor of Technical Sciences, Acting Professor of the Department of "General Physics" BSU. Nosiri Khusrava, Bokhtar.

**Теплопроводность толуола с учетом влияния наночастиц с
эффектами памяти “форм” на линии насыщения**

**Thermal conductivity of toluene taking into account the influence of
nanoparticles with memory effects “forms” on the saturation line**

Ключевые слова: жидкий толуол, теплопроводность, концентрация, нанопорошок диоксид титана.

Аннотация: В статье приводятся результаты экспериментально-теоретического исследования теплоносителей толуола на линии насыщения. Результаты исследования показали, что добавки наночастиц с эффектами памяти “форм” увеличивают коэффициент эффективной теплопроводности

химического чистого жидкого толуола на линии насыщения. На основе данных по теплопроводности наножидкостей системы толуола и наночастиц с эффектами памяти “форм” получены эмпирические уравнения.

Keywords: liquid toluene, thermal conductivity, concentrations, nanoparticle, (TiO₂).

Abstract: The article presents the results of an experimental and theoretical study of toluene coolants on the saturation line. The results of the study showed that the addition of nanoparticles with “shape memory” effects increase the coefficient of effective thermal conductivity of chemically pure liquid toluene on the saturation line. Empirical equations are obtained on the basis of data on the thermal conductivity of nanofluids of the toluene system and nanoparticles with memory effects.

Диоксид титана. В промышленности и технологиях достаточно часто применяется диоксид титана (TiO₂). Диоксид титана (с эффектами памяти «форм») является амфотерным оксидом с более ярко выраженным основным характером. Известны три полиморфные кристаллические модификации диоксида титана – анатаз, рутил и брукит. Все указанные полиморфные модификации встречаются в природе в виде соответствующих минералов. Чаще всего в природе диоксид титана находится в загрязненном состоянии, при этом наблюдается окраска минерала в зависимости от загрязняющих элементов, чаще всего это железо [1]. Синтетический или очищенный диоксид титана представляет собой белый порошок, при нагревании материал приобретает желтоватую окраску. При нагревании порошка диоксида титана происходит переход вещества из аморфного состояния в кристаллическое, при этом наблюдается выделение большого количества теплоты [1].

Получение титана можно проводить в системе титан-кислород. На практике получить двуокись титана можно при горении тонко измельченного титана в избытке чистого кислорода или же при горении расплавленного титана в избытке чистого кислорода. По данным ПЭМ, диаметр синтезированных частиц находился на уровне (20-25) нм, а длина превышала 100 нм. По результатам низкотемпературной адсорбции азота удельная площадь поверхности составила 135 м²/г, а средний размер пор – 10 нм.

Наряду с порошками и тонкими плёнками диоксид титана также применяется в виде одномерных структур [2].

Толуол. Толуол как высокооктановый компонент бензина вырабатывается из нефтяного сырья. Первой стадией его получения является каталитический риформинг прямогонной фракции, выкипающий в пределах 62-105°C (или 62 - 120°C). Полученный из этого сырья стабильный катализатор содержит 35-45%. Разделить катализатор на отдельные углеводороды обычной ректификацией невозможно, так как ароматические углеводороды образуют с алканами и цикланами нераздельно кипящие (азеотропные) смеси. Для выделения ароматических углеводородов применяется экстракция. В качестве экстрагента используют растворы диэтиленгликоля или более эффективные растворы три- и тетраэтиленгликоля. На установке экстракции получают следующие продукты: бензол, толуол, ксилолы, этилбензол, высшие ароматические углеводороды и деароматизированный бензин (рафинат). При этом выход толуола на исходное сырье составляет 16,5%, бензола - 11%, ксилолов и этилбензола -4,5%. Рафинат (деароматизированный).

Теплопроводность жидкого толуола изучена гораздо подробнее, чем любого другого органического вещества. Число публикаций приближается к ста. Такой большой интерес к теплопроводности толуола вызван в основном двумя обстоятельствами. Во-первых, толуол играет роль образцового вещества. Во-вторых, толуол оказался одним из первых веществ, для которого теоретически и экспериментально изучали роль радиационного переноса теплоты [3-5].

Для определения теплопроводности наножидкостей системы жидкого толуола и наночастиц диоксида титана нами использована экспериментальная установка, работающая методом нагретой нити, и теоретически рассчитана теорией Максвелла [6, 7].

Результаты исследования теплопроводности жидкого толуола в зависимости от температуры на линии насыщения измерены авторами [8] и приведены ниже в таблице 1.

Таблица 1. Теплопроводность жидкого толуола на линии насыщения, (Вт/(м.К)).

T,К	$\lambda 10^3$						
180	159	270	140	370	115	460	94
190	158	280	137	380	112	470	92
200	157	290	135	390	110	480	90
210	155	300	132	400	108	490	88
220	153	310	130	410	105	500	85
230	150	330	125	420	103	510	83
240	147	340	122	430	101	520	81
250	143	350	120	440	99	540	78
260	142	360	117	450	97	550	76

Авторы работ [8], используя данные приведенные в таблице 2, на основе теории термодинамического подобия, получили уравнение (1):

$$\lambda \cdot 10^{-3} = 215,8 - 0,2567(T) - 2,4 \cdot 10^{-4}(T)^2 + 2,184 \cdot 10^{-7}(T)^3, \text{Вт/(м.К)} \quad (1)$$

Результаты экспериментально-теоретические исследование для коллоидных нано-жидкостей системы толуол и наночастиц с эффектами памяти “форм” фракции (70нм и концентрации наночастиц изменялось в пределах 0-0,5%) при различных температурах и на линии насыщения представлены в таблице 2.

Таблица 2. Эффективное коэффициент теплопроводности (λ ,Вт/(м.К)) чистого жидкого толуола и внедренных в нем наночастиц с эффектами памяти “форм” фракциями (70нм) на линии насыщения.

Образец №1	Образец №2	Образец №3	Образец №4	Образец №5	Образец №6
T,К	$\lambda \cdot 10^3$				
180	159	160,2*	161,8*	162,5*	167,8*
200	157	158,3*	159,4*	161,4*	162,8*

220	153	154,5*	157,2*	159,2*	160,3*	162,0
240	147	148,5*	152,0*	154,7*	157,0*	160,0*
260	142	143,5*	147,5*	150,4*	154,3*	158,3*
280	137	142,2*	144,6*	146,8*	149,8*	152,0*
300	132	141	143	144	147	149
320	127	136	138	140	142	144
340	122	131	133	135	137	139
360	117	126	128	130	132	134
370	115	124	126	128	130	132
380	112	121	123	125	127	130
390	110	119	121	123	125	127
400	108	117	119	121	123	125
410	105	113	115	117	120	122
420	103	111	113	115	119	120
430	101	110	112	114	116	118
440	99	108	110	112	114	116
450	97	106	108	110	112	114
460	94	103	105	107	109	111
470	92	101	104	105	107	109
480	90	99	101	103	105	107
490	88	97	99	101	103	106
500	85	94	96	98	101	102
510	83	92	94	96	98	100
520	81	90	92	94	96	98
540	78	87	89	91	93	95
550	76	85	87	89	91	94

Объекты исследования: №1-(толуол х.ч.); №2-(толуол х.ч.+0,1%.TiO₂); №3-(толуол х.ч. + 0,2%.TiO₂); №4-(толуол х.ч.+0,3%.TiO₂); №5-(толуол х.ч.+0,4%.TiO₂); №6-(толуол х.ч.+ 0,5 %TiO₂), (** - данные авторов работы [8]), (*- численный расчет по урав.3).

Результаты определение коэффициента теплопроводности на линии насыщения (таблиц 3) показало, что с повышением температуры теплопроводности исследуемых растворов (т.е. бинарных растворов) на линии насыщения уменьшается по линейному закону и с увеличением концентрации диоксид титана наноразмерный фракции растет по линейному закону. Для х.ч. толуола изменения температуры от 290 до 550 К теплопроводность падает на 77,63%, для образца №2- (х.ч. толуол +0,1%TiO₂ (70нм) (таблица 3) - уменьшается на 69, 41 %. Добавки 0,5%TiO₂ (70нм)

приводит к падению теплопроводности данного раствора на 61,7%. Например, коллоидный раствор системы толуол добавленных до 0,5%TiO₂ (70нм) при температуре 290 К, теплопроводность растет на 12,59%, а при температуре 550 К это разница доходит до 23,68%. Надо отметить, что такие тенденции изменения коэффициента теплопроводности наблюдаются для других коллоидных растворов на основе толуола.

Для обобщения экспериментальных данных по теплопроводности исследуемых растворов на основе толуола и наночастиц с эффектами памяти “форм” при атмосферном давлении (0,101 МПа) на линии насыщения в интервале температуры (180-550) К, нами использованы следующие функциональные зависимости (2):

$$\frac{\lambda}{\lambda_1} = f\left(\frac{T}{T_1}\right), \quad (2)$$

где λ , λ_1 - коэффициент теплопроводности исследуемых растворов при температурах T и T_1 : $T_1 = 360$ К.

Таблица 3. Зависимость относительной теплопроводности (λ/λ_1) от относительной температуры (T/T_1) исследуемых коллоидных наножидкостей на линии насыщения.

T/T_1	№1	№2	№3	№4	№5	№6
0,50	1,36	-	-	-	-	-
0,61	1,31	-	-	-	-	-
0,72	1,21	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12
0,83	1,13	1,07	1,08	1,09	1,08	1,09
0,94	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04
1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1,11	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
1,17	0,92	0,93	0,92	0,93	0,92	0,93
1,22	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88
1,28	0,80	0,81	0,80	0,81	0,80	0,81

1,39	0,77	0,78	0,77	0,78	0,77	0,78
1,44	0,73	0,72	0,73	0,72	0,73	0,72
1,53	0,65	0,66	0,65	0,67	0,66	0,67

Объекты исследования: №1-(толуол х.ч.); №2-(толуол х.ч.+0,1%.TiO₂); №3-(толуол х.ч. +0,2%.TiO₂); №4-(толуол х.ч.+0,3%.TiO₂); №5-(толуол х.ч.+0,4%.TiO₂); №6-(толуол х.ч.+0,5%.TiO₂), (** - данные авторов работы [8])

λ / λ_1

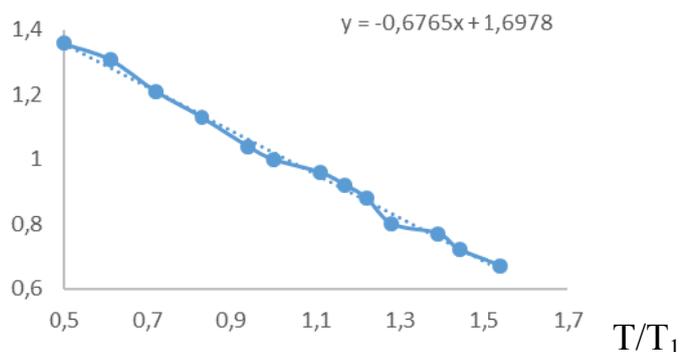


Рис 1. Зависимость относительной теплопроводности (λ/λ_1) от относительной температуры (T/T_1) исследуемых коллоидных наножидкостей на линии насыщения.

$$\lambda = [1,6978 - 0,6765(T/T_1)] * \{0,112(n_{TiO_2}/n_{TiO_2}^*) + 0,899\} (0,326d + 130,25) 10^{-3}, Bm/(m \cdot K) \quad (3)$$

С помощью выражение (3) можно численно определить теплопроводность наножидкостей на основе толуола, как в чистом виде, так и внедренным в них наночастиц с эффектами памяти “форм” с различными фракциями (30нм, 50нм и 70нм), температуры (180-550)К и давления (0,101) МПа. Для данного расчета по формула (3) необходимо значение T, K и концентрации диоксида титана внедренных в толуоле (n_{TiO_2}) в процентном соотношения. Результаты численных расчетов по уравнениями (3) для некоторых коллоидных наножидкостей на основе толуола, как в чистом виде, так добавленным наночастиц с эффектами памяти “форм”. Результаты численных расчетов по уравнениями (3) для некоторых коллоидных наножидкостей на основе толуола, как в чистом виде, так добавленным наночастиц с эффектами памяти “форм” приведены в таблице 4.

Таблица 4. Сравнение вычисленных значение теплопроводности коллоидных растворов на линии насыщения системы толуола с различными фракциями с экспериментальными данными по уравнением (3).

Коэффициент эффективного теплопроводности расчет по форм. (3)								
Образец №2-(х.ч. толуол+0,1%TiO ₂),30нм								
$\lambda_{\text{экс.}} \cdot 10^3, \text{ Вт/(м*К)}$	139,7	134,5	130,4	125,5	120,8	116,7	-	--
$\lambda_{\text{рас.}} \cdot 10^3, \text{ Вт/(м*К)}$	140,8	137,6	134,5	130,4	127,7	124,5	-	-
$\Delta, \%$	-0,79	-2,3	-3,34	-3,9	-5,4	-6,2	-	-
$\delta, \%$	Средний квадратический погрешность расчета плотности по урав. (3) -3,67							
Образец №6-(х.ч. толуол+0,5%TiO ₂),70нм								
$\lambda_{\text{экс.}} \cdot 10^3, \text{ Вт/(м*К)}$	173,4	166,6	163,7	161,6	155,8	152,7	-	--
$\lambda_{\text{рас.}} \cdot 10^3, \text{ Вт/(м*К)}$	174,8	174,1	170,3	165,9	161,8	157,7	-	-
$\Delta, \%$	-0,8	-4,3	-3,88	-2,59	-3,85	-3,27	-	-
$\delta, \%$	Средний квадратический погрешность расчета плотности по урав. (3) -3,12							

Как видно, из результатов численных расчетов по аппроксимационные зависимостей полученных нами по уравнением (3) (таблица 4) со среднекватратического погрешности -3.65% совпадает с экспериментальными данными теплопроводности. Результаты численных расчетов согласуются с экспериментальными данными.

Список литературы

1. Марьева, Е.А., Попова О.В. Электрохимическое модифицирование титана в водноорганических электролитах. Монография. Таганрог. Издательство Южного федераль-ного университета. 2016.-166с.

2. **El-Sherbiny, S.** Synthesis, characterization and application of TiO₂ nano-powders as special paper coating pigment /El-Sherbiny S., Fatma Morsy F., Samir M., Fouad O.A. // Appl Nanosci – 2014. – V. 4 – P. 305–313.
3. **Poitz, H.** // Int. J. Heat Mass Transf. 1965. Vol. 5. P. 515-527; 1965. Vol. 8.- P. 609-620.
4. **Расторгуев Ю.Л.,** Ганиев Ю.А., Сафронов Г.А. // ИФЖ. 1977. Т. 33, № 2. - С. 275 - 279.
5. **Справочник** по теплопроводности жидкостей и газов / Н.Б. Варгафтик, Л.П. Филиппов, А.А. Тарзиманов, Е.Е. Тоцкий. // М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
6. **Сафаров, М.М. и др.** Устройства для определения коэффициента теплопроводности наножидкостей. Патент Республики Таджикистан № ТЈ 923, Душанебе, 2017. – 5 с.
7. **Димитриев А.С.** Введение в нанотеплофизику / А.С. Димитриев // М.: БИНОМ. Лаборатория знания. - 2015. – 790 с.
8. **Теплопроводность** жидкостей и газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик, Л.П. Филиппов, и др. // Изд-во стандартов, М., 1978. – 708 с.

Рудобашта С.П.
Rudobashta S.P.

ФГБОУ ВО "Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К.А. Тимирязева», г. Москва
Russian State Agrarian University – МТАА, Moscow

Рудобашта Станислав Павлович – д.т.н., профессор, профессор
кафедры "Теплотехника, гидравлика и энергообеспечение предприятий»

Rudobashta Stanislav Pavlovich – doctor of engineering, Professor, Professor
of the Department «Heat Engineering, Hydraulics and Power Supply of Enterprises»

Исследование массопроводных свойств высушиваемых материалов

Study of the mass-conducting properties of dried materials

Ключевые слова: сушка; массопроводность; зональный метод; математическое моделирование; влагосодержание; температура.

Аннотация: Рассмотрены: кинетический расчет процесса сушки на основе теоретических методов и зональный метод определения концентрационной зависимости коэффициента массопроводности, необходимого для этих расчетов.

Key words: drying; mass conductivity; zonal method; math modeling; moisture content; temperature.

Abstract: Considered: the kinetic calculation of the drying process based on theoretical methods and the zonal method for determining the concentration dependence of the mass conductivity coefficient required for these calculations.

Сушка широко распространена в различных технологиях [1, 2]. Это, а также большие энергозатраты на сушку обуславливают большой практический и научный интерес к этому процессу, о чем свидетельствуют многочисленные международные конференции [3], такие как «International Drying Symposium», «European Drying Conference», «Nordic Drying Conference», «Nordic Baltic Drying Conference», «Современные энергосберегающие тепловые технологии – сушка и термовлажностная обработка материалов», «Минский международный форум по тепломассообмену» (работает секция по сушке). На них большое внимание уделяется математическому моделированию процесса сушки, основной

целью которого является кинетический расчет сушилки – определение ее рабочего объема, обеспечивающего заданную производительность. Для кинетического расчета сушилок в настоящее время все чаще применяют теоретические методы, основанные на решениях дифференциальных уравнений тепло- и массопроводности, описывающих внутренний тепломассоперенос в высушиваемых материалах (уравнения А.В. Лыкова). Это обусловлено общим развитием теории сушки, повсеместным распространением персональных компьютеров, развитием аналитических и численных методов расчета, накоплением данных по теплофизическим характеристикам материалов [4].

Перенос влаги в материале при сушке осуществляется под действием градиента влагосодержания (массопроводность), градиента температуры (термовлагопроводность) и градиента общего давления (фильтрационный массоперенос). Однако, в подавляющем большинстве случаев (за исключением высокотемпературных процессов, когда температура материала достигает 100 °С и выше, последними двумя видами массопереноса можно пренебречь и описывать внутренний массоперенос исключительно на основе уравнения массопроводности (диффузии влаги):

$$\vec{i} = -k \rho_0 \text{grad} u, \quad (1)$$

где i – плотность потока влаги, кг/(м² с); k – коэффициент массопроводности, м²/с; ρ_0 – плотность абсолютно сухого материала, кг/м³; u – локальное влагосодержание материала, кг/(кг сух. м-ла).

Коэффициент массопроводности зависит от температуры t (°С) и влагосодержания материала u : $k = f(t, u)$. Уравнению (1) соответствует нелинейное дифференциальное уравнение массопроводности [5, 6]

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \text{div}(k \text{grad} u), \quad (2)$$

где τ – время, с.

Зависимость коэффициента массопроводности от температуры и наличие внутренних фазовых превращений (испарение влаги) заставляет при

описании внутреннего массопереноса параллельно рассматривать поле температур – на основе нелинейного дифференциального уравнения теплопроводности, имеющего вид [5, 6]

$$c\rho_0 \frac{\partial t}{\partial \tau} = \text{div}(\lambda \text{grad } t) + \frac{du_\phi}{du} r^*, \quad (3)$$

где c , λ - теплоемкость (Дж/(кг К)) и теплопроводность (Вт/(м К)) влажного материала, соответственно; u^* - локальное изменение влагосодержания материала, вызванное испарением влаги, кг/(кг сух. м-ла); r^* - удельная теплота фазового перехода связанной влаги, включающая в себя теплоту парообразования и теплоту десорбции, Дж/кг.

Расчет кинетики сушки с использованием уравнений (2) и (3) требует знания параметров k , c , λ , ρ_0 , r^* , $\frac{du_\phi}{du}$. Теплофизические характеристики c и λ

для многих материалов определены (см., например, [7]), плотность абсолютно сухого материала ρ_0 достаточно легко определяется, при задании r^* в технических расчетах теплотой десорбции обычно пренебрегают. Таким образом, основным параметром, создающим трудности для выполнения этих расчетов, является коэффициент массопроводности k . Трудности при экспериментальном нахождении этого коэффициента обусловлены рядом причин: 1) существенной его зависимостью от влагосодержания и температуры материала, 2) отсутствием миниатюрных датчиков типа термопар для определения локальных влагосодержаний, что не позволяет применять на практике многие методы измерений, аналогичные тем, что применяют в теплопроводности, 3) многие высушиваемые материалы имеют достаточно малые размеры (гранулы и проч.).

Прорывным моментом в определении концентрационных зависимостей коэффициента массопроводности в системах с твердой фазой (сушка, адсорбция, экстрагирование) явилось разработка зонального метода его определения из кривой кинетики (при сушке – из кривой сушки), снимаемой во внутридиффузионном кинетическом режиме [8]. Применение этого метода

позволило за годы, прошедшие с момента его опубликования, получить температурно-концентрационные зависимости для многих высушиваемых материалов - непористых (полимеры), капиллярно-пористых (адсорбенты и проч.), капиллярно-пористых коллоидных (семена различных культур и проч.). Многие из этих данных обобщены в работах [6, 8, 10]. В.М. Дмитриевым в ТГТУ создана уникальная лабораторная установка, позволяющая проводить прецизионные исследования по изучению массопроводных свойств малоразмерных материалов (гранул, семян и проч.), на которой проведены исследования многих материалов, существенно расширивших банк данных по обсуждаемому коэффициенту.

Концентрационную зависимость коэффициента массопроводности находят, используя зональный метод из экспериментальной кривой сушки с разбиением ее на ряд (5-7) концентрационных зон, в пределах которых коэффициент массопроводности считают постоянным. Расчетная формула для i -той концентрационной зоны, следующая из решения задачи массопроводности в регулярном режиме, имеет вид [6]

$$k_i = \frac{R_i^2}{\mu_i^2 \tau_i} \ln \frac{B_i}{E_i}, \quad (4)$$

где i – номер концентрационной зоны; B_i – параметр, согласно [6] равный: $B_{1,i} \cdot \gamma_i$; $B_{1,i=1}$ – первый предэкспоненциальный множитель в решении задачи массопроводности, в котором принято равномерное начальное распределение влагосодержания в теле; γ_i – коэффициент, учитывающий изменение начальной концентрации при переходе от зоны « $i - 1$ » к i – той зоне при $i > 1$ (его значения приведены в [6]; μ_i – первый положительный корень в характеристическом решении задачи массопроводности, зависящий от формы тела [6].

В [6] показано, что принятие $\mu_{i-1} = \mu_i$ без ущерба для точности расчета позволяет в уравнении (4) считать $B_i = 1$ во всех концентрационных зонах, отвечающих условию $i > 1$. Практика расчетов коэффициента массопроводности показывает также, что значение $B_i = 1$ приемлемо и в

первой концентрационной зоне. Это объясняется тем, что влагосодержание в испытуемом образце в момент начала процесса фактически не является равномерным, а определенным образом сформировалось с понижением к поверхности тела. В зарубежных работах, посвященных определению коэффициента массопроводности (диффузии влаги), например в [11], также отмечается, что значение $B_{1,i=1} = 1$ дает более точные расчетные значения коэффициента массопроводности.

Расчет необходимого времени пребывания материала в сушилке теоретическими методами осуществляется как на основе аналитических решений задачи, так и численных. В первом случае для учета изменения теплофизических характеристик и других параметров процесса в [12] был предложен также зональный метод, описанный выше применительно к определению коэффициента массопроводности. При расчете кинетики сушки используется решение задачи массопроводности в регулярном режиме массообмена при граничном условии массообмена 3-го рода [6]. Расчетное уравнение имеет вид уравнения (4), записанного по отношению ко времени τ_i – необходимому времени пребывания высушиваемого материала в i – той концентрационной зоне. Общее необходимое время пребывания материала в сушилке равно сумме: $\tau = \sum_{i=1}^n \tau_i$, где n – число выбранных концентрационных зон.

Многие высушиваемые капиллярно-пористые коллоидные материалы растительного и животного происхождения дают усадку в процессе сушки, что необходимо учитывать в кинетическом расчете. В [13] показано, что это достаточно делать путем учета изменения размеров высушиваемого материала и можно пренебречь перемещением сечения материала, для которого записывается уравнение массопроводности – ввиду малости вклада от этого перемещения.

Список литературы

1. **Mujumdar A.S.** (Ed). Handbook of Industrial Drying. Fourth Edition. CRC Press, Boca Raton, Taylor & Francis Group, FL. 2014. – 1301 p.
2. **Kudra T.**, Mujumdar Arun S. Advanced Drying Technologies. Marcel Dekker, Inc. New York • Basel. 2002. – 459 p.
3. **Рудобашта С.П.** Современное состояние и направления развития теории и практики сушки // Сб. научных трудов Седьмой Международной научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы) СЭТТ – 2020», 13–15 октября 2020, Москва, Изд. ООО «Мегаполис». - С. 13-21.
4. **Рудобашта С.П.** Математическое моделирование процесса конвективной сушки дисперсных материалов // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2000. № 4. - С. 98-108.
5. **Лыков А.В.** Теория сушки. Изд. 2-е, пер. и доп. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
6. **Рудобашта С.П.** Массоперенос в системах с твердой фазой. Под ред. Заслуженного деятеля науки РСФСР, профессора А.Н. Плановского, М.: Химия. 1980. – 248 с.
7. **Теплофизические** характеристики пищевых продуктов и материалов. Справочное пособие. Под ред. проф. А.С. Гинзбурга. М.: Пищевая промышленность. 1975. – 224 с.
8. **Очнев Э.Н., Рудобашта С.П., Плановский А.Н., Дмитриев В.М.** Зональный метод определения зависимости коэффициента массопроводности от концентрации // Теор. основы хим. технол. 1975. Т. IX, № 4. - С. 491-495.
9. **Рудобашта С.П., Дмитриев В.М.** Кинетика и аппаратурно-технологическое оформление конвективной сушки дисперсных полимерных материалов // Инж.- физ. журнал. 2005. Т. 78, № 3. - С. 51-60.
10. **Рудобашта С.П., Карташов Э.М.** Химическая технология: диффузионные процессы. Часть 2. 3-е издание. М.: Юрайт. – 296 с.

11. **Alves-Filho O.**, Senadeera W., Eikevik T. Influence of drying conditions on the moisture diffusion during single stage and two stage fluidized bed drying of bovine intestine for pet food // 6-th Nordic Drying Conference), 5-7 June 2013, Copenhagen, Denmark (electronic edition).

12. **Рудобашта С.П., Очнев Э.Н., Плановский А.Н.** Зональный метод расчета кинетики процесса сушки // Теор. основы хим. технол. 1975. Т. IX, № 2. - С. 185-192.

13. **Rudobashta S. P., Kartashov É. M., Zueva G. A.** Mathematical modeling of the process of convective drying of materials taking into account their shrinkage // Journal of Engineering Physics and Thermo physics. 2020. Vol. 93, No. 6, November. - P. 1394-1401.

Гутовский А.В., Латышенко К.П., Усович А.В.
Gutovskiy A.V., Latishenko K.P., Usovich A.V.

ФГБВОУ ВО «Академия гражданской защиты МЧС России», г. Химки
Civil Defence Academy EMERCOM of Russia, Khimki

Гутовский Алексей Вениаминович – старший преподаватель кафедры (инженерной защиты населения и территорий); **Латышенко Константин Павлович** – д.т.н., профессор кафедры (механики и инженерной графики); **Усович Алексей Викторович** – преподаватель кафедры (инженерной защиты населения и территорий).

Gutovskiy Alexey Veniaminovich – Senior Lecturer of the Department of Engineering Protection of Population and Territories; **Latishenko Konstantin Pavlovich** – D Sc. (Technical), Professor Chair of Operation of Mechanics and Engineering Graphics; **Usovich Alexey Viktorovich** – Lecturer of the Department of Engineering Protection of Population and Territories.

Защита людей от опасных факторов лесного пожара при отсутствии возможности эвакуации в безопасное место

Protection of people from dangerous factors of a forest fire in the absence of the possibility of evacuation to a safe place

Ключевые слова: тепловое воздействие, безопасность дыхания, лесной пожар, средство защиты, автомобиль, эвакуация.

Аннотация: В статье рассмотрен вопрос обеспечения безопасности людей в период эвакуации на личном автотранспорте из населенных пунктов, в сторону которых движется верховой лесной пожар. Предложено применение мобильного средства защиты людей от теплового воздействия лесного пожара в случае окружения автомобиля горячей кромкой пожара, в условиях отсутствия возможности движения в безопасном направлении.

Key words: heat exposure, respiratory safety, forest fire, protective equipment, car, evacuation.

Abstract: The article considers the issue of ensuring the safety of people during the evacuation by private vehicles from settlements in the direction of which a riding forest fire is moving. It is proposed to use a mobile means of protecting people from the thermal effects of a forest fire in the case of a car surrounded by a burning edge of a fire, in the absence of the possibility of moving in a safe direction.

Как за рубежом, так и в нашей стране происходят случаи гибели людей, попавших в огненную ловушку крупных лесных пожаров.

Наиболее известные примеры подобных ситуаций приведены далее.

2017 год, Португалия. Лесной пожар унес жизни 63-х человек. Десятки человек были заблокированы огнем на трассе, 30 из них погибли в собственных машинах [1]. На рисунке 1 видно, что первые автомобили, остановившиеся на дороге, заблокировали остальным проезд, создав пробку.

2020 год, Северная Калифорния США. Пожар лишил жизни 79-ти человек, некоторых из них во время эвакуации [2]. На рисунке 2 показаны сгоревшие автомобили, которые съехали на обочину. Судьба пассажиров неизвестна. Возможно, кому-то удалось спастись.



Рис. 1 – Гибель людей на трассе в Португалии.



Рис. 2 – Гибель людей на дороге в США.

2018 год, Греция. В результате лесных пожаров погибло более 60-ти человек [3]. Некоторых смерть наступила при эвакуации на личном автотранспорте (рисунок 3).

Россия, Забайкальский край, 2015 год. Очевидец сделал видеосъемку, на которой машины двигались по трассе сквозь огненный коридор лесного пожара, один из автомобилей движется в дыму с пылающей крышей (рисунок 4). На этот раз обошлось без жертв.



Рис. 3 – Гибель людей в Греции.



Рис. 4 – Горящий автомобиль в Забайкальском крае [4].

Пожарные также сталкиваются с подобными проблемами, не смотря на высокий уровень подготовки к действиям подразделений в экстренных ситуациях (рисунок 5).



Рис. 5 – Пожарные автомобили, сгоревшие в лесном пожаре.

Согласно 123-му Федеральному закону во время пожара на человека действуют следующие опасные факторы: пламя и искры; тепловой поток; повышенная температура окружающей среды; повышенная концентрация токсичных продуктов горения и термического разложения; пониженная концентрация кислорода; снижение видимости в дыму.

Исходя из выше перечисленного, обеспечение безопасности человека должно осуществляться по двум основным направлениям: защита от тепловых воздействий пожара и обеспечение безопасного дыхания. Выполнить данные условия можно за счет применения средства защиты, отвечающего следующим требованиям: высокая мобильность; соответствие эргономическим требованиям; быстрое применение в экстренной ситуации;

стойкость материалов к тепловым нагрузкам; защита организма человека от высоких температур; обеспечение безопасного дыхания.

Исходя из предъявляемых к средству защиты требований, разработан проект конструкции (рисунок 6), на которую получен патент РФ на изобретение [5].

Средство защиты представляет собой быстровозводимую многослойную палатку из термостойких и теплоизоляционных материалов, которая в транспортном положении уложена в сумку и перевозится в багажнике машины или в одном из отсеков пожарного автомобиля.

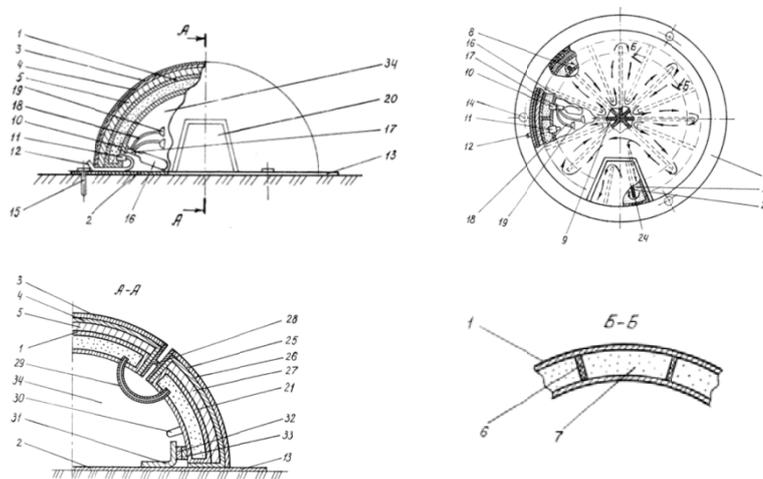


Рис. 6 – Устройство мобильного средства защиты людей от лесного пожара.

Средство защиты состоит: 1 – полая оболочка корпуса; 2 – дно; 3 – внешний защитный слой корпуса, выполненный из материала, отражающего ИК-излучение; 4 – защитный слой корпуса из термостойкого материала; 5 – защитный слой корпуса из теплоизоляционного материала; 6 – внутренние перегородки полый оболочки корпуса; 7 – секции полый оболочки корпуса; 8 – межсекционные воздушные переходы полый оболочки корпуса; 9 – замыкающая перегородка; 10 – впускной клапан; 11 – выпускной клапан; 12 – гибкий высокотемпературный шланг; 13 – юбка дна; 14 – отверстия для фиксации устройства; 15 – колышки; 16 – баллон со сжатым воздухом; 17 –

редуктор; 18 – шланги подачи воздуха; 19 – дыхательные маски; 20 – дверь; 21 – полая оболочка двери; 22 – секции полой оболочки двери; 23 – перегородки полой оболочки двери; 24 – межсекционные воздушные переходы полой оболочки двери; 25 – защитный слой двери, выполненный из материала, отражающего ИК-излучение; 26 – защитный слой двери из термостойкого материала; 27 – защитный слой двери из теплоизоляционного материала; 28 – гибкий узел соединения двери с полой оболочкой корпуса; 29 – шланг поступления воздуха в дверь; 30 – ручка закрывания двери; 31 – клапан фиксации двери; 32 – текстильная липучая лента клапана фиксации двери; 33 – текстильная липучая лента двери; 34 – внутреннее пространство мобильного средства защиты.

В случае возникновения ситуации, грозящей неизбежной гибелью людей (например, при окружении огнем), средство защиты извлекается из сумки, переносится на безопасное расстояние от автомобиля и приводится в рабочее положение подачей воздуха из баллона в пневматическую оболочку, служащую каркасом.

Люди размещаются в центре его внутреннего пространства, сидя спиной друг к другу. Дыхание осуществляется из баллона со сжатым воздухом через подключенные к нему дыхательные маски.

После прохождения горячей кромки лесного пожара, люди через дверной проем покидают средство защиты и уходят по выгоревшей местности в направлении противоположном движению огня или ожидают прибытие спасательных служб.

Исходя из того, что в нашей стране большое количество населенных пунктов расположенных в лесах Сибири и Дальнего востока, находятся под угрозой уничтожения огнем лесного пожара, целесообразно применение подобных мобильных средств защиты для обеспечения безопасности людей в условиях окружения верховым пожаром.

Список литературы

1. **Число** жертв лесных пожаров в Португалии возросло до 63 человек [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ria.ru/20170619/1496863601.html> (дата обращения: 01.10.2021).
2. **Число** жертв пожаров в Калифорнии достигло 79 человек [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://vz.ru/news/2018/11/18/951108.html> (дата обращения: 01.10.2021).
3. **Грецию** охватили лесные пожары [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://tass.ru/proisshestviya/5397588> (дата обращения: 01.10.2021).
4. **Поездка** на машине сквозь горящие леса Забайкалья [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=L9Ic2wJrRsc> (дата обращения: 01.10.2021).
5. **Гутовский А.В.,** Гомонай М.В. Мобильное средство защиты людей от лесного пожара // Патент России №2683736. 2019, Бюл. № 10.

Майникова Н.Ф., Рогов И.В., Никулин С.С.
Mainikova N.F., Rogov I.V., Nikulin S. S.

ФГБОУ ВО "Тамбовский государственный технический университет",
г. Тамбов

Tambov State Technical University, Tambov

Майникова Нина Филипповна – д.т.н., профессор, профессор кафедры "Энергообеспечение предприятий и теплотехника"; **Рогов Иван Владимирович** – к.т.н., доцент кафедры "Энергообеспечение предприятий и теплотехника"; **Никулин Сергей Сергеевич** – к.т.н., доцент кафедры "Энергообеспечение предприятий и теплотехника".

Mainikova Nina Filippovna – doctor of engineering, Professor, Professor of the Department "Power supply and heat engineering"; **Rogov Ivan Vladimirovich** – candidate of technical Sciences, docent of the Department " Power supply and heat engineering"; **Nikulin Sergej Sergeevich** – candidate of technical Sciences, docent of the Department " Power supply and heat engineering".

О законе движения границы фазового перехода

On the law of motion of the phase transition boundary

Ключевые слова: математическая модель, неразрушающий контроль, полимер, теплопроводность, фазовый переход.

Аннотация: Представлены теоретические выкладки, позволяющие определить неразрушающим способом закон движения границы фазового перехода в полуограниченном теле из полимерного материала при нагреве от плоского круглого нагревателя постоянной мощности.

Key words: Mathematical model, non-destructive testing, polymer, heat water, phase transition.

Abstract: Theoretical calculations are presented to determine the law of the movement of the boundary of the phase transition in a semi-reduced body from the polymer material when heated from a flat circular heater of constant power.

Методы решения краевых задач теплопроводности, относящихся к областям с движущимися границами, существенно упрощаются, когда движение границы известно [1]. Например, закон движения границы раздела фаз при твердофазных переходах в кристаллических полимерных материалах (ПМ). Рассматривается измерительная схема (рис. (а)). Нагрев полимерного

тела осуществляется с помощью источника тепла, выполненного в виде тонкого диска радиусом $R_{\text{пл}}$, который встроен в измерительный зонд (ИЗ).

Фиксируются зависимости избыточной температуры T от времени [1]. ФП в ПМ происходят при постоянной температуре $T_{\text{п}}$. И использована аналогия: распределение температуры в исследуемом теле от круглого источника тепла постоянной мощности радиуса $R_{\text{пл}}$ при $\tau \gg 0$ близко к распределению температуры в сферическом полупространстве со сферической полостью радиуса R , через которую осуществляется тепловое воздействие [2]. В момент $\tau = 0$ на сферической поверхности начинает действовать источник постоянной мощности с мощностью q (рис. (б)). При температуре $T = T_{\text{п}}$ материал имеет ФП, сопровождающийся поглощением тепла. Теплота перехода – $Q_{\text{п}}$ [Дж/м³]. ТФС тела в результате ФП меняются незначительно. Пока температура в любой точке тела ниже температуры ФП, задача будет описываться классическим уравнением теплопроводности в сферических координатах с граничными условиями второго рода на

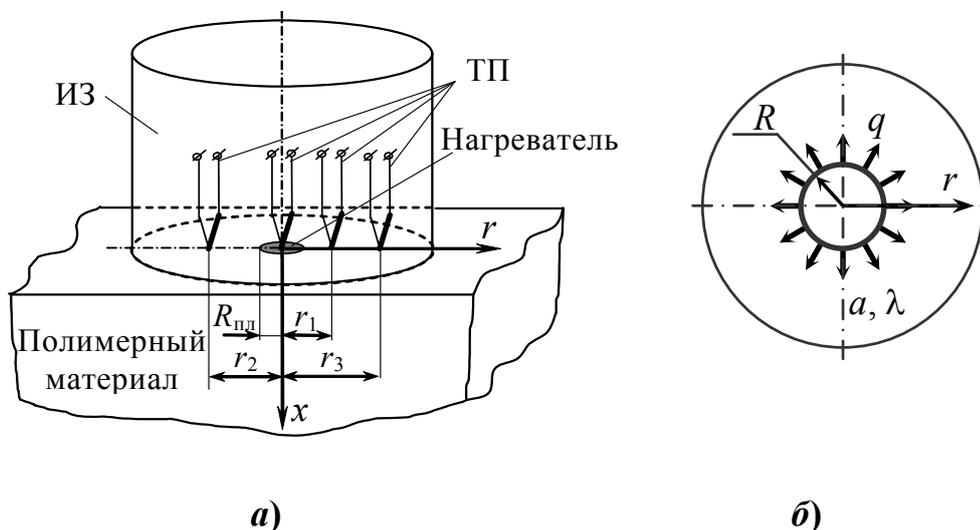


Рис. 1. Измерительная (а) и тепловая (б) схемы метода.

поверхности с координатами $r = R$.

Решение такой задачи известно и имеет вид [2]:

$$T(r, \tau) = \frac{R^2 q}{\lambda r} \left\{ \operatorname{erfc} \left(\frac{1}{2} \frac{r - R}{\sqrt{a\tau}} \right) - \exp \left(\frac{r - R}{R} + \frac{a\tau}{R^2} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{1}{2} \frac{r - R}{\sqrt{a\tau}} + \frac{\sqrt{a\tau}}{R} \right) \right\} \quad (1)$$

Максимальная температура тела будет у поверхности с координатами $r = R$.

Подставив $\tau_{\text{нп}}$ в выражение (1), найдено температурное поле на начало ФП. Для этого в выражение (1) вместо r подставлено значение R , а вместо $T(r, \tau) - T = T_{\text{п}}$. Уравнение относительно $\tau_{\text{нп}}$:

$$T_{\text{п}} = \frac{R q \left(1 - \exp\left(\frac{a\tau_{\text{нп}}}{R^2}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{a\tau_{\text{нп}}}}{R}\right) \right)}{\lambda}. \quad (2)$$

Введены обозначения: $\text{Fo} = \frac{a\tau}{R^2}$, $\zeta = \frac{r}{R}$. В квазистационарном состоянии: $T_{\text{ст}}(r) = \frac{q R^2}{\lambda r}$. На поверхности: $T_{\text{max}} = \frac{q R}{\lambda}$. Величина:

$$\Theta(\zeta, \text{Fo}) = \frac{T(r, \tau)}{T_{\text{max}}}.$$

С учетом выражения $\Theta(\zeta, \text{Fo}) = \frac{\lambda T(r, \tau)}{q R}$, время начала ФП: $\text{Fo}_{\text{нп}} = \frac{a\tau_{\text{нп}}}{R^2}$

. Температура ФП: $\Theta_{\text{п}} = \frac{\lambda T_{\text{п}}}{q R}$. $\Theta_{\text{п}} = 1 - \exp(\text{Fo}_{\text{нп}}) \operatorname{erfc}(\sqrt{\text{Fo}_{\text{нп}}})$, так как

$$\Theta(\zeta, \text{Fo}) = \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2} \frac{\zeta - 1}{\sqrt{\text{Fo}}}\right) - \exp(\zeta - 1 + \text{Fo}) \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2} \frac{\zeta - 1}{\sqrt{\text{Fo}}} + \sqrt{\text{Fo}}\right)}{\zeta}.$$

После начала ФП, распределение температуры в теле находится из задачи Стефановского типа. Начальное распределение в безразмерной форме:

$$\Theta_0(\zeta) = \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2} \frac{\zeta - 1}{\sqrt{\text{Fo}_{\text{нп}}}}\right) - \exp(\zeta - 1 + \text{Fo}_{\text{нп}}) \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2} \frac{\zeta - 1}{\sqrt{\text{Fo}_{\text{нп}}}} + \sqrt{\text{Fo}_{\text{нп}}}\right)}{\zeta}.$$

Обозначения: $T_1(r, \tau)$ и $T_2(r, \tau)$ – распределение температуры в теле в первой и во второй фазах; $T_1(r, \tau)$ и $T_2(r, \tau)$ – температурные поля в пределах $R < r < r_{\text{п}}(\tau)$ и $r_{\text{п}}(\tau) < r < \infty$; $r_{\text{п}}(\tau)$ – закон движения границы ФП.

Введены: $\zeta_{\Pi} = \frac{r_{\Pi}}{R}$ – координата границы ФП; $\Omega_{\Pi} = \frac{Q_{\Pi} a}{qR}$ – теплота ФП.

Сформулирована также задача в безразмерной форме [3], где $\zeta_{\Pi} = f(\text{Fo})$ – свободная граница, которая не задана и подлежит определению вместе с $\Theta_1(\zeta, \text{Fo})$ и $\Theta_2(\zeta, \text{Fo})$.

Постановка задачи:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} T_1(r, \tau) = \frac{a \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial}{\partial r} T_1(r, \tau) \right) \right)}{r^2}, R < r < r_{\Pi}(\tau), \tau > 0; \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} T_2(r, \tau) = \frac{a \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial}{\partial r} T_2(r, \tau) \right) \right)}{r^2}, r_{\Pi}(\tau) < r < \infty, \tau > 0; \quad (4)$$

$$T_2(r, 0) = T_0(r), r > R; \quad \lambda \left(\frac{\partial}{\partial r} T_1(R, \tau) \right) = -q, \tau > 0; \quad (5), (6)$$

$$T_2(\infty, \tau) = 0, \tau > 0; \quad T_1(r_{\Pi}(\tau), \tau) = T_2(r_{\Pi}(\tau), \tau), \tau > 0; \quad (7), (8)$$

$$\lambda \left(\frac{\partial}{\partial r} T_1(r_{\Pi}(\tau), \tau) \right) - \lambda \left(\frac{\partial}{\partial r} T_2(r_{\Pi}(\tau), \tau) \right) = Q_{\Pi} \left(\frac{\partial}{\partial r} r_{\Pi}(\tau) \right), \tau > 0. \quad (9)$$

В безразмерной форме выполнено асимптотическое разложение $\text{erfc}(x)$ при больших x . Определены:

$$\text{Fo}_{\text{нп}} = \frac{1}{(1 - \Theta_{\Pi})^2 \pi}; \quad \Theta = 1 - \frac{\zeta - 1}{\sqrt{\pi} \sqrt{\text{Fo}}} - \frac{\sqrt{\text{Fo}}}{\sqrt{\pi} \left(\frac{1}{2} \zeta - \frac{1}{2} + \text{Fo} \right)}.$$

Найдено Θ_{Π} . Для определения закона движения границы ФП проведен ряд преобразований и в качестве искомым функций предложены [3]:

$$\zeta_{\Pi}(\text{Fo}) = \frac{\text{Fo}^{\kappa} + m}{\Theta_{\Pi} \text{Fo}^{\kappa} + m}, \quad \kappa > 0, m > 0;$$

$$\zeta_{\Pi}(Fo) = \frac{\left(Fo \pi(1 - \Theta_{\Pi})^2 + m^{1/\kappa}\right)^{\kappa} - (1 - \Theta_{\Pi})m}{\Theta_{\Pi} \left(Fo \pi(1 - \Theta_{\Pi})^2 + m^{1/\kappa}\right)^{\kappa}}, \kappa > 0, m > 0;$$

$$\zeta_{\Pi}(Fo) = \frac{\left(Fo \pi(1 - \Theta_{\Pi})^2 + m^{1/\kappa}\right)^{\kappa}}{\Theta_{\Pi} \left(Fo \pi(1 - \Theta_{\Pi})^2 + m^{1/\kappa}\right)^{\kappa} + (1 - \Theta_{\Pi})m}, \kappa > 0, m > 0.$$

Получены результаты численного решения задачи и практической реализации метода определения закона движения границы ФП в полимере [3].

Список литературы

1. **Лыков А.В.** Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 559 с.
2. **Теплопроводность** твердых тел / Карслоу Г., Егер Д. М.: Наука, 1964. – 488 с.
3. **Определение** закона движения границы раздела фаз в полимере / Жуков Н.П., Майникова Н.Ф., Рогов И.В., Никулин С.С. // Вестник Тамбовского государственного технического университета, 2009, Т. 15, №1. – С. 120 – 126.

УДК 697.921:633.63; 631.243.4

Завражнов¹ А.И., Балашов² А.В., Толстошеин³ С.С., Кольцов^{1,2} С.М.
Zavrazhnov¹ A.I., Balashov² A.V., Tolstoshein³ S.S., Koltsov^{1,2} S.M.

¹ФГБОУ ВО "Мичуринский государственный аграрный университет", г. Мичуринск; ²ФГБНУ "Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве", г. Тамбов; ³ООО "Системы моделирования", г. Тамбов
¹Michurinsk State Agrarian University, Michurinsk; ²All-Russian Research Institute for the Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture, Tambov; ³LLC "Modeling systems", Tambov

Завражнов Анатолий Иванович – академик РАН, д.т.н., профессор кафедры "Технологических процессов и техносферной безопасности"; **Балашов Александр Владимирович** – д.т.н., заведующий лабораторией "Использования машинно-тракторных агрегатов"; **Толстошеин Сергей Серафимович** – к.т.н., генеральный директор; **Кольцов Семен Михайлович** – аспирант кафедры "Технологических процессов и техносферной безопасности".

Zavrazhnov Anatoly Ivanovich – academician of the Russian Academy of Sciences, doctor of technical sciences, Professor of the Department of "Technological Processes and Techno sphere Safety"; **Balashov Alexander Vladimirovich** – doctor of technical sciences, head of the laboratory of "Use of machine and tractor units"; **Tolstoshein Sergey Serafimovich** – candidate of technical sciences, director; **Koltsov Semen Mikhailovich** – postgraduate student of the Department of "Technological Processes and Techno sphere Safety".

Совершенствование методики расчета потерь свекломассы при хранении в кагатах

Improvement of the methodology for calculating beet mass losses during storage in sugar beet storage

Ключевые слова: конвективный теплообмен; сахарная свекла; корнеплод; кагат; потери свекломассы.

Аннотация: Проведено сравнение нормативных потерь массы сахарной свеклы с результатами экспериментальных исследований в условиях естественного конвективного теплообмена.

Key words: convective heat transfer; sugar beet; root crop; storage; beet mass loss.

Abstract: The comparison of the normative weight losses of sugar beet with the results of experimental studies under the conditions of natural convective heat exchange is carried out.

В условиях ограниченных производственных мощностей сахарные заводы не могут переработать весь объем возделанной сахарной свеклы в течение периода массовой уборки. Часть сахарной свеклы хранится в кагатах для переработки в поздние сроки работы завода до декабря-января [1]. Хранение сахарной свеклы в кагатах сопровождается потерями свекломассы. В действующих нормативных документах потери свекломассы при длительном хранении для 2-ой климатической группы, к которой относится Тамбовская область, значительно ниже значений, полученных в ходе практических наблюдений (таблица 1) [2]. Для подтверждения расхождения нормативных значений с практическими результатами были проведены исследования в условиях минимального воздействия факторов, приводящих к потерям свекломассы.

Таблица 1. Нормативные потери свекломассы при длительном хранении для 2-ой климатической группы.

Месяц	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Январь
Потери свекломассы, %	0,113	0,070	0,035	0,034	0,060

Источниками потерь свекломассы являются как внутренние, так и внешние факторы. К внутренним относятся биохимические процессы «дыхания» корнеплодов, приводящее к выделению тепла и влаги. К внешним факторам относится воздействие окружающей среды: солнечная радиация, естественная конвекция, приводящая к выносу влаги из межкорневого пространства, а также воздействие ветровой нагрузки на склоны кагата. Межкорневое пространство занимает 38% объема в кагате сахарной свеклы. В процессе хранения при отсутствии воздействия внешних факторов относительная влажность воздуха в межкорневом пространстве составляет 87-95%. Насыщение воздуха межкорневого пространства обеспечивается путем испарения влаги с поверхности корнеплодов. Для отведения избыточной теплоты из кагата в ряде случаев используется система активной

вентиляции, однако процесс вентилирования сопровождается выносом влаги из кагата [4].

Изменение количества тепла Q в кагате сахарной свеклы описывается следующим уравнением [3]:

$$Q = Q_{\text{дых}} + Q_l + Q_k - Q_u - Q_g \quad (1)$$

где $Q_{\text{дых}}$ – теплота, выделяемая при дыхании корнеплодов, Дж; Q_l – теплота, полученная от солнечной радиации, Дж; Q_k – теплота, полученная или отданная через поверхность массива корнеплодов за счет естественной конвекции воздуха между окружающей средой и межкорневым пространством, Дж; Q_u – теплота, отданная за счет испарения влаги из массива корнеплодов, Дж; Q_g – теплота, отведенная из кагата при работе активной вентиляции, Дж.

В процессе хранения масса корнеплодов в кагате $M_{\text{св}}$ уменьшается за счет удаления влаги. Потери свекломассы описываются уравнением:

$$M'_{\text{св}} = M_{\text{св}} - (m_{\text{дых}} + m_k + m_g) \quad (2)$$

где $m_{\text{дых}}$ – потери, полученные при дыхании сахарной свеклы, кг; m_k – потери, вызванные естественной конвекцией воздуха между окружающей средой и межкорневым пространством, кг; m_g – потери, вызванные принудительной конвекцией воздуха при работе активной вентиляции, кг.

При проведении исследований по совершенствованию технологии и разработке режимов хранения сахарной свеклы в кагатах изучалось влияние отдельных факторов на сохранность массива корнеплодов таких как: ветровая нагрузка на склоны кагата и работа системы активной вентиляции. В том числе проведено исследование по изучению влияния естественного конвективного теплообмена между окружающей средой и массивом корнеплодов сахарной свеклы при минимальном воздействии ветра [4].

В ходе эксперимента влияние других факторов было уточнено во время проведения исследований на установке (рисунок 1). Наличие навеса над установкой обеспечило защиту массива корнеплодов от попадания прямых солнечных лучей и осадков.

Боковые ограждающие конструкции превышали высоту емкости для хранения сахарной свеклы 1 на 0,7 м и обеспечили снижение скорости ветра непосредственно над массивом корнеплодов до минимальных значений. Емкость имела внутренний объем для хранения 1 м³ сахарной свеклы массой 668,4 кг. Измерение массы корнеплодов осуществлялось взвешиванием емкости на подвесных крановых весах 3 с помощью домкрата и рычага 5 за траверсу 4. Измерение температуры проводилось с помощью проводного датчика, установленного в центре массива корнеплодов на расстоянии 0,5 м от граней.

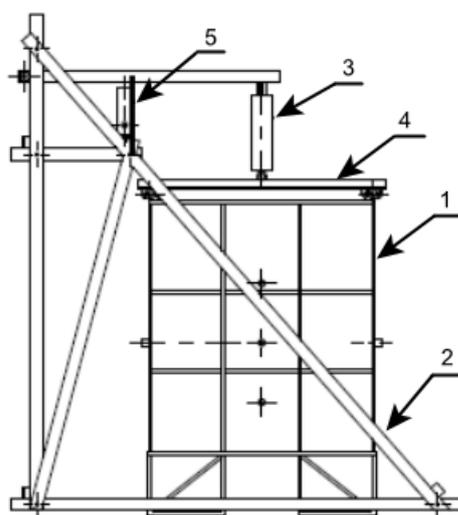


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – емкость для хранения корнеплодов; 2 – каркас; 3 – домкрат; 4 – весы подвесные; 5 – траверса.

Исследования были начаты в ноябре 2020 года с начальной температурой корнеплодов 5,8°C. На протяжении периода исследований температура корнеплодов находилась преимущественно в диапазоне -4...+2°C. При данной температуре корнеплодов интенсивность процесса дыхания, а соответственно выделения тепла и влаги было минимальным.

Тогда зависимость потерь свекломассы при конвективном теплообмене приобретает вид:

$$M'_{св}(\tau) = f(T_{окр}, d_{окр}, T_{св}, d_{св}) \quad (3)$$

где $T_{окр}$, $T_{св}$ – температура наружного воздуха и свеклы, °C; $d_{окр}$, $d_{св}$ – влагосодержание воздуха окружающей среды и межкорневого пространства сахарной свеклы соответственно, г/кг. Измерения проводились раз в сутки на протяжении 43 дней.

Результатом проведенного исследования и регрессионного анализа данных стала математическая модель, описывающая потери свекломассы от температуры и влагосодержания воздуха окружающей среды и межкорневого пространства корнеплодов сахарной свёклы:

$$M'_{св}(\tau) = 0.616 - 0.384 \cdot d_{окр} + 0.031 \cdot T_{св} + 0.25 \cdot d_{св} + 0.01 \cdot T_{окр} \quad (4)$$

Уравнение позволило определить потери свекломассы в течение срока хранения ежесуточно. При сопоставлении данных, полученных в ходе расчета с экспериментальными, было установлено, что ошибка в расчетах не превышает 4,3%. На рисунке 2 представлены графики потерь свекломассы.

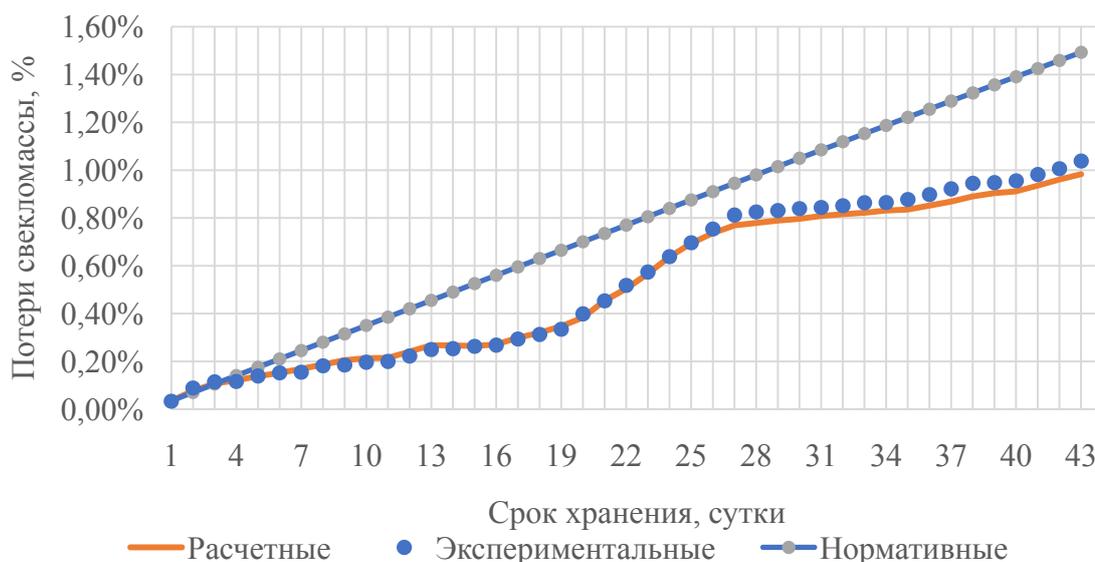


Рис. 2. Графики потерь свекломассы.

При сравнении полученных результатов с нормативными потерями свекломассы в кагатах для ноября месяца, установлено существенное различие. Данные потерь, полученные в ходе эксперимента, меньше нормативных потерь на 0,46%. Эксперимент по хранению сахарной свеклы был проведен в оптимальных условиях: было минимизировано влияние

солнечной радиации, осадков, ветра, а также внутренних биохимических процессов. В ранее проведенных исследованиях было установлено, что наличие солнечной радиации и ветровой нагрузки приводит к возрастанию потерь свекломассы до 6,5% в кагате без вентиляции высотой 6,5 м, что превышает нормативные потери в 4,3 раза [4]. Текущие нормативные потери подходят для учета потерь в лабораторных условиях, которые на производстве не могут быть достигнуты в полной мере.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости проработки современных нормативов потерь свекломассы, в которых следует учитывать не только климатическую группу, но и габаритные размеры кагатов, наличие системы активного вентилирования, применение укрытий и средств обработки от бактериальных и грибковых поражений.

Список литературы

1. **Завражнов А.И.** Обоснование и разработка технологии хранения сахарной свёклы в кагатах в условиях Центрально-Чернозёмного региона / А.И. Завражнов, С.М. Кольцов // Сахар. – 2020. – № 1. – С. 38-44.
2. **Приказ** Минсельхоза РФ от 28.08.2006 N 270 "Об утверждении норм естественной убыли продукции и сырья сахарной промышленности при хранении" (Зарегистрировано в Минюсте РФ 03.10.2006 N 8352)
3. **Zavrzhnov A.I.** Mathematical modeling of the temperature regime in a ventilated pile of sugar beet / A.I. Zavrzhnov, N.V. Zuglenok, A.A. Zavrzhnov, S.S. Tolstoshein, S.M. Koltsov // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, 2020 – P. 62067
5. **Кольцов С.М.** Исследование вопроса потери свекломассы при хранении сахарной свеклы в кагате / С.М. Кольцов // Материалы 73-й Межд. научно-практ. кон-ция «Современная аграрная наука: актуальные вопросы, достижения и инновации». – Мичуринск, 2021. – С. 152-156.

Жиркова А.А., Дивин А.Г.
Zhirkova A.A., Divin A.G.

ФГБОУ ВО "Тамбовский государственный технический университет",
г. Тамбов
Tambov State Technical University, Tambov

Жиркова Александра Александровна - аспирант кафедры «Мехатроника и технологические измерения» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов; **Дивин Александр Георгиевич** - д.т.н., профессор кафедры «Мехатроника и технологические измерения» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов.

Zhirkova A.A. - postgraduate student of the Department of "Mechatronics and Technological Measurements", Tambov State Technical University, Tambov; **Divin A.G.** - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of "Mechatronics and Technological Measurements", Tambov State Technical University, Tambov.

Тепловой контроль растительных тканей овощей и фруктов

Thermal control of vegetable tissues of vegetables and fruits

Ключевые слова: гиперспектральный контроль, дефекты плодов, объекты растительного происхождения, роботизированный комплекс, сортировка, сохранность продуктов, система технического зрения, спектроскопия.

Аннотация: в статье дано описание системы оптического контроля качества яблок.

Keywords: hyperspectral control, fruit defects, objects of plant origin, robotic complex, sorting, safety of products, technical vision system, spectroscopy.

Abstract: the article describes the system of optical quality control of apples.

Для получения качественной информации об изучаемом объекте теплового контроля можно использовать современные гиперспектрометры [1-5]. Они превосходят другие устройства по объему получаемой информации и по показателям точности, охватывают широкий диапазон длин волн, регистрируемые спектры имеют высокое разрешение по длине волны.

На кафедре "Мехатроника и технологические измерения" ФГБОУ ВО "ТГТУ" был создан макет роботизированного комплекса, позволяющий автоматизировать процесс выявления дефектов растительных тканей овощей и фруктов.

Разработанный роботизированный комплекс включает в себя:

1. Загрузочный бункер.
2. Рольганговый конвейер.
3. Систему технического зрения.

Яблоки одного сорта помещают в загрузочный бункер, далее они подаются на рольганговый конвейер (по нему яблоки движутся поступательно перемещаясь вдоль оси x и одновременно вращаясь), где происходит оценка качества фруктов и отбраковка.

Также в комплексе предусмотрено поворотное зеркало, при помощи которого отраженный от поверхности объекта контроля свет фокусируется на чувствительных элементах гиперспектральной камеры. Поворот зеркала согласован с координатами объекта на конвейере в течение времени, за которое он совершит полный оборот. Это время рассчитывается по среднему диаметру объекта, скорости протяжки роликов, а также по их геометрическим параметрам. Для определения координат, а также среднего диаметра объекта контроля используется камера видимого диапазона спектра. Изменение положения зеркала (угла поворота к оси x) осуществляется приводом, подключенным к системе управления и персональному компьютеру (ноутбуку). Несоответствующие объекты отбраковываются с конвейера манипулятором.

Система технического зрения включает в себя гиперспектральную камеру Specim-FX10, камеру видимого диапазона Basler acA1920-155uc с интерфейсом GigE, CMOS-матрицей Sony IMX174 и частотой 164 кадра в секунду при разрешении 2,3 Мп, а также персональный компьютер (ноутбук) с установленным программным обеспечением. Гиперспектральная камера имеет спектральный диапазон 400-1000 нм, 224 спектральных полос,

разрешением 2,5 нм, пространственную дискретизацию 1024 пикселя, частоту 330 fps. Оптическое воздействие на объекты контроля осуществляют две галогеновые лампы типа R7S Haloline Eco 64690 Osram, 80 W 2900 K. Для визуализации и обработки спектрограмм используется ноутбук с процессором Intel Core i5 8300H (2,3ГГц – 4,0 ГГц в режиме Turbo), 8Гб ОЗУ, видеокартой GeForce GTX 1050 3Гб. Используемый комплекс оснащен промышленным коллаборативным роботом UR3 Universal Robots, предназначенным для отбраковки дефектных яблок.

Программное обеспечение ноутбука выполняет следующие функции:

- обнаружение объекта контроля на линии транспортировки (на конвейере) и определения координат поврежденного объекта контроля на линии транспортировки;
- обработка спектрограмм яблок;
- передача управляющих команд контроллеру манипулятора UR3, осуществляющего сортировку фруктов.

Входными данными алгоритма являются информация, поступающая с гиперспектральной камеры Specim FX10, а также с камеры видимого спектра Basler. При обнаружении дефектного объекта на линии транспортировки определяются его координаты, которые вносятся в массив дефектных объектов. Входными данными алгоритма являются: массив, содержащий классифицированные области объекта контроля (A); массив, содержащий время обнаружения каждого из дефектных объектов контроля, отсортированных в порядке возрастания времени обнаружения (B); объект-соединение по последовательному интерфейсу с модулем ввода-вывода. Массив B содержит значения системного времени обнаружения дефектного объекта. Если в массиве A присутствует дефектный объект и массив B пустой, то в массиве B сохраняется текущее системное время обнаружения дефектного объекта. Если в массиве A присутствует дефектный объект и массив B непустой, то новое время обнаружения дефектного объекта добавляется в массив B при условии, что со времени обнаружения

последнего дефектного объекта прошло не менее, чем необходимо для полного прохождения объекта контроля через зону контроля системы технического зрения. Оно вычисляется как отношение максимального диаметра объекта контроля к скорости движения конвейерной ленты. Далее при условии непустого массива B , если наступило время отбраковки текущего дефектного объекта, то генерируется сигнал на модуль ввода-вывода по последовательному интерфейсу. Цифровой сигнал с модуля ввода-вывода передается на цифровой вход контроллера робота-манипулятора, который выполняет один цикл перемещений по заранее заданной траектории для отбраковки текущего дефектного объекта.

Финансирование: Техническое обеспечение системы сканирования яблок создано при поддержке РФФИ (проект №20-38-90235/20).

Нейросетевой алгоритм и программное обеспечение для определения качества яблок разработан при поддержке Управления образования и науки Тамбовской области (грант №30-МУ-21 (02)), полученный в рамках областного конкурса “Гранты для поддержки прикладных исследований молодых ученых 2021 года”.

Список литературы

1. **A. Solovchenko et al.**, “Linking tissue damage to hyperspectral reflectance for non-invasive monitoring of apple fruit in orchards,” *Plants*, vol. 10, no. 2, 2021, doi: 10.3390/plants10020310.
2. **Y. Yu, S. A. Velastin**, and F. Yin, “Automatic grading of apples based on multi-features and weighted K-means clustering algorithm,” *Inf. Process. Agric.*, vol. 7, no. 4, 2020, doi: 10.1016/j.inpa.2019.11.003.
3. **N. Kondo**, “Fruit grading robot,” in *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM*, 2003, vol. 2, doi: 10.1109/AIM.2003.1225542.
4. **W. Jia**, Y. Zhang, J. Lian, Y. Zheng, D. Zhao, and C. Li, “Apple

harvesting robot under information technology: A review,” *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 17, no. 3. 2020, doi: 10.1177/1729881420925310.

5. **P. V. Balabanov et al.**, “Technical vision system for quality control of objects of the ball-shaped form when sorting on the conveyor,” in *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1546, no. 1, doi: 10.1088/1742-6596/1546/1/012001.

Власов В.В.
Vlasov V.V.

ФГБОУ ВО "Московский государственный университет имени
М.В.Ломоносова", г. Москва
LomonosovMoscow StateUniversity, Moscow

Власов Виктор Валентинович – д.ф.-м.н., профессор, профессор
кафедры математического анализа механико-математического факультета.

Vlasov Viktor Valentinovich - Doctor of Ph.D., Professor, Professor.
Departments of Mathematical Analysis of the Faculty of Mechanics and
Mathematics.

**Исследование вольтерровых интегро-дифференциальных уравнений,
возникающих в теплофизике и теории вязкоупругости**

**Investigation of Voltaire integro-differential equations arising in
thermophysics and the theory of viscoelasticity**

Ключевые слова: интегро-дифференциальные уравнения, оператор-
функция, спектр, вольтерров оператор.

Аннотация: Работа посвящена исследованию вольтерровых интегро-
дифференциальных уравнений с неограниченными операторными
коэффициентами в гильбертовом пространстве. Рассматриваемые уравнения
представляют собой абстрактное гиперболическое уравнение, возмущенное
слагаемыми, содержащими вольтерровы интегральные операторы. Эти
уравнения могут быть реализованы, как интегро-дифференциальные
уравнения в частных производных, возникающие в теории вязкоупругости
(см. [4], [15]), а также как интегродифференциальные уравнения Гуртина-
Пипкина (см. [1], [6]), которые описывают процесс распространения тепла в
средах с памятью с конечной скоростью, кроме того, указанные уравнения
возникают в задачах усреднения в многофазных средах (закон Дарси) (см.
[9]).

Key words: integro-differential equations, operator-function, spectra, Volterra
operator.

Abstract: The work is devoted to the study of Volterra integro-differential
equations with unbounded operator coefficients in Hilbert space. The equations in
consideration are an abstract hyperbolic equation perturbed by terms containing
Volterra integral operators. These equations can be realized as integro-differential

equations in partial derivatives arising in the theory of viscoelasticity (see [4], [15]), as well as integro-differential Gurtin-Pipkin equations (see [1], [6]), which describe the process of heat propagation in media with memory with finite speed, in addition, these equations arise in averaging problems in multiphase media (law of Darcy).

1. Постановка задачи. Основные определения.

Пусть H - сепарабельное гильбертово пространство, A - самосопряженный положительный оператор, $A^* = A$, $\kappa_0 > 0$, действующий в пространстве H , имеющий компактный обратный, I - тождественный оператор в пространстве H .

Пусть B - симметрический оператор $(Bx, y) = (x, By)$, действующий в пространстве H с областью определения $Dom(A)$ ($Dom(A) \subseteq Dom(B)$), неотрицательный, $(Bx, x) \geq 0$ для любых $x, y \in Dom(A)$ и, удовлетворяющий неравенству $\|Bx\| \leq \kappa \|Ax\|$, $0 < \kappa < 1$ для любого $x \in Dom(A)$.

Рассмотрим следующую задачу для интегро-дифференциального уравнения второго порядка на положительной полуоси $\mathbb{R}_+ = (0, \infty)$:

$$\frac{d^2 u(t)}{dt^2} + Au(t) + Bu(t) - \int_0^t K(t-s)Au(s)ds - \int_0^t Q(t-s)Bu(s)ds = f(t), \quad t \in \mathbb{R}_+, \quad (1)$$

$$u(+0) = \varphi_0, \quad u^{(1)}(+0) = \varphi_1. \quad (2)$$

Предположим, что ядра интегральных операторов $K(t)$ и $Q(t)$ имеют следующее представление:

$$K(t) = \int_0^\infty e^{-t\tau} d\mu(\tau), \quad Q(t) = \int_0^\infty e^{-t\tau} d\eta(\tau), \quad (3)$$

где $d\mu$ и $d\eta$ - положительные меры, которым соответствуют возрастающие, непрерывные справа функции распределения μ и η , соответственно. Интеграл понимается в смысле Стильтьеса. Кроме того, будем считать, что выполнены условия

$$\int_0^{\infty} \frac{d\mu(\tau)}{\tau} < 1, \quad \int_0^{\infty} \frac{d\eta(\tau)}{\tau} < 1, \quad (4)$$

$$K(0) = \int_0^{\infty} d\mu(\tau) \equiv \text{Var} \mu|_0^{\infty} < +\infty, \quad Q(0) = \int_0^{\infty} d\eta(\tau) \equiv \text{Var} \eta|_0^{\infty} < +\infty, \quad (5)$$

причем носители μ и η принадлежат полуоси $(d_0, +\infty)$, $d_0 > 0$.

Интегро-дифференциальное уравнение (1) представляет собой абстрактную форму динамического уравнения вязкоупругости, где операторы A и B порождаются следующими дифференциальными выражениями

$$A = -\rho^{-1} \mu \left(\Delta u + \frac{1}{3} \text{grad}(\text{div} u) \right), \quad B = -\frac{1}{3} \rho^{-1} \lambda \cdot \text{grad}(\text{div} u),$$

где $u = \vec{u}(x, t) \in \square^3$ - вектор перемещений вязкоупругой наследственной изотропной среды, среда заполняет ограниченную область $\Omega \subset \square^3$ с достаточно гладкой границей $\partial\Omega$ ρ - постоянная плотность, $\rho > 0$, коэффициенты Ламе λ, μ - положительные постоянные, $K(t)$, $Q(t)$ - функции релаксации, характеризующие наследственные свойства среды. На границе области $\partial\Omega$ выполняется краевое условие Дирихле

$$u|_{\partial\Omega} = 0. \quad (6)$$

В качестве пространства H рассматривается пространство трехмерных вектор-функций $L_2(\Omega)$. Область определения $Dom(A)$ принадлежит векторному пространству Соболева $W_2^2(\Omega)$ и естественно выделяется краевым условием (6). Условие (4) имеет конкретный физический смысл (см. [15]).

В случае, когда оператор $B = 0$, а самосопряженный положительный оператор A реализован, как $Au = -\Delta u$ с условиями Дирихле в ограниченной области с достаточно гладкой границей, уравнение (1) представляет собой абстрактную форму уравнения Гуртина-Пипкина, описывающего процесс распространения тепла в средах с памятью с конечной скоростью.

Рассматривая преобразование Лапласа уравнения (1) при однородных начальных условиях, получаем оператор-функцию

$$L(\lambda) = \lambda^2 I + A + B - \hat{K}(\lambda)A - \hat{Q}(\lambda)B, \quad (7)$$

которая является символом этого уравнения. Здесь $\hat{K}(\lambda)$ и $\hat{Q}(\lambda)$ - преобразования Лапласа ядер $K(t)$ и $Q(t)$, соответственно, имеющие представления

$$\hat{K}(\lambda) = \int_0^\infty \frac{d\mu(\tau)}{\lambda + \tau}, \quad \hat{Q}(\lambda) = \int_0^\infty \frac{d\eta(\tau)}{\lambda + \tau}. \quad (8)$$

В предлагаемой работе мы исследуем вопрос о локализации спектра для оператор-функции $L(\lambda)$, являющейся символом указанного уравнения и устанавливаем корректную разрешимость начальной задачи для уравнения (1) в весовых пространствах Соболева на положительной полуоси.

В наших предшествующих работах [11] – [13] проводилось подробное исследование задачи (1), (2) в случае, когда оператор $B = 0$. Наш подход к исследованию основывался на спектральном анализе оператор-функции (7), который также дает возможность получить результат о корректной разрешимости и представление решения указанной задачи в виде ряда по экспонентам, соответствующим точкам спектра оператор-функции $L(\lambda)$. Отметим также, что результаты работ [11] – [12] подытожены в главе 3 монографии [13].

2. Корректная разрешимость.

Обозначим оператор $A_0 := A + B$. Согласно известному результату (теорема [3], р. 361), оператор A_0 является самосопряженным и положительным. Превратим область определения $Dom(A_0^\beta)$ оператора A_0^β , $\beta > 0$ в гильбертово пространство H_β , введя на $Dom(A_0^\beta)$ норму $\|\cdot\|_\beta = \|A_0^\beta \cdot\|$, эквивалентную норме графика оператора A_0^β .

Через $W_{2,\gamma}^n(\square_+, A_0)$ обозначим пространство Соболева вектор-функций на полуоси $\square_+ = (0, \infty)$ со значениями в H снабженное нормой

$$\|u\|_{W_{2,\gamma}^n(\square_+, A_0)} \equiv \left(\int_0^\infty e^{-2\gamma t} \left(\|u^{(n)}(t)\|_H^2 + \|A_0^{n/2} u(t)\|_H^2 \right) dt \right)^{1/2}, \quad \gamma \geq 0.$$

Подробнее о пространствах $W_{2,\gamma}^n(\square_+, A_0)$, см. монографию [5], глава 1.

При $n=0$ полагаем $W_{2,\gamma}^0(\square_+, A_0) \equiv L_{2,\gamma}(\square_+, H)$, при $\gamma=0$, будем писать $W_{2,0}^n = W_2^n$.

Определение. Будем называть вектор-функцию u сильным решением задачи (1), (2), если она принадлежит пространству $W_{2,\gamma}^2(\square_+, A_0)$, для некоторого $\gamma \in \mathbb{R}$, удовлетворяет уравнению (1) почти всюду на полуоси \square_+ , и начальным условиям (2).

Определение. Будем называть вектор-функцию u обобщенным решением задачи (1), (2), если она принадлежит пространству $W_{2,\gamma}^1(\square_+, A_0^{1/2})$, для некоторого $\gamma \in \mathbb{R}$, удовлетворяет и удовлетворяет интегральному тождеству

$$\begin{aligned} & -\langle u^{(1)}(t), v^{(1)}(t) \rangle_{L_{2,\gamma}} + \left\langle (A+B)^{1/2} u(t), (A+B)^{1/2} v(t) \right\rangle_{L_{2,\gamma}} + 2\gamma \langle u^{(1)}(t), v(t) \rangle_{L_{2,\gamma}} - \\ & - \left\langle \int_0^t K(t-s)(A+B)^{-1/2} Au(s) ds, (A+B)^{1/2} v(t) \right\rangle_{L_{2,\gamma}} - \\ & - \left\langle \int_0^t Q(t-s)(A+B)^{-1/2} Bu(s) ds, (A+B)^{1/2} v(t) \right\rangle_{L_{2,\gamma}} - \\ & - \langle f(t), v(t) \rangle_{L_{2,\gamma}} - \langle \varphi_1, v(0) \rangle = 0, \end{aligned}$$

для любой вектор-функции $v(t) \in W_{2,\gamma}^1(\square_+, A_0^{1/2})$, а также условию (2).

Следующая теорема дает достаточное условие корректной разрешимости задачи (1), (2).

Теорема 1. Пусть выполнено условие (5), $f'(t) \in L_{2,\gamma_0}(\square_+, H)$ для некоторого $\gamma_0 \in \mathbb{R}$ и $f(0) = 0$, кроме того, $\varphi_0 \in H_1$, $\varphi_1 \in H_{1/2}$. Тогда существует такое $\gamma_1 \in \mathbb{R}$, что для любого $\gamma > \gamma_1$ задача (1), (2) имеет

единственное решение в пространстве $W_{2,\gamma}^2(\square_+, A_0)$, удовлетворяющее неравенству

$$\|u\|_{W_{2,\gamma}^2(\square_+, A_0)} \leq d \left(\|f'(t)\|_{L_{2,\gamma}(\square_+, H)} + \|A_0 \varphi_0\|_H + \|A_0^{1/2} \varphi_1\|_H \right), \quad (9)$$

где константа d не зависит от вектор-функции f и векторов φ_0, φ_1 .

Теорема 2. Пусть выполнено условие (5), $f(t) \in L_{2,\gamma_0}(\square_+, H)$ для некоторого $\gamma_0 > 0$, кроме того, $\varphi_0 \in H_{1/2}$, $\varphi_1 \in H$. Тогда существует такое $\gamma_1 > \gamma_0$, что для любого $\gamma > \gamma_1$ задача (1), (2) имеет единственное обобщенное решение в пространстве $W_{2,\gamma}^1(\square_+, A_0^{1/2})$, удовлетворяющее неравенству

$$\|u\|_{W_{2,\gamma}^1(\square_+, A_0^{1/2})} \leq d \left(\|f(t)\|_{L_{2,\gamma}(\square_+, H)} + \|A_0^{1/2} \varphi_0\|_H + \|\varphi_1\|_H \right), \quad (9)$$

где константа d не зависит от вектор-функции f и векторов φ_0, φ_1 .

Следует отметить, что метод, используемый нами для доказательства корректной разрешимости начальных задач для абстрактных интегродифференциальных уравнений, существенно отличается от более традиционного подхода, использованного Л. Пандолфи в работе [8], где разрешимость изучается в функциональном пространстве на конечном временном интервале $(0, T)$. В нашей работе разрешимость изучается в весовых пространствах Соболева $W_{2,\gamma}^2(\square_+, A_0)$ вектор-функций на положительной полуоси \square_+ , где A_0 - положительный самосопряженный оператор в гильбертовом пространстве. Доказательство теоремы 1 о разрешимости существенно использует гильбертову структуру пространств $W_{2,\gamma}^2(\square_+, A_0)$, $L_{2,\gamma}(\square_+, H)$, а также теорему Пэли-Винера, в то время, как в работе [8] рассуждения проводятся в банаховом функциональном пространстве гладких функций на конечном временном интервале $(0, T)$.

Уместно отметить, что из теоремы 1 немедленно вытекает результат о разрешимости задачи (1), (2) на конечном временном интервале $(0, T)$ в пространстве $W_2^2((0, T), A_0)$ для любого $T > 0$.

Определение. Будем называть вектор-функцию решением почти всюду задачи (1), (2), если она принадлежит пространству $W_2^2((0,T), A_0)$, для любого $T > 0$, удовлетворяет уравнению (1) почти всюду на полуоси \square_+ , и начальным условиям (2).

Теорема 3. Пусть выполнено условие (5), $f'(t) \in L_2((0,T), H)$ для любого $T > 0$ и $f(0) = 0$ кроме того, $\varphi_0 \in H_1$, $\varphi_1 \in H_{1/2}$. Тогда задача (1), (2) имеет единственное решение почти всюду, принадлежащее пространству $W_2^2((0,T), A_0)$, удовлетворяющее неравенству

$$\|u\|_{W_2^2((0,T), A_0)} \leq K \left(\|f'(t)\|_{L_2((0,T), H)} + \|A_0 \varphi_0\|_H + \|A_0^{1/2} \varphi_1\|_H \right), \quad (10)$$

с постоянной $K = K(T)$, независимой от вектор-функции f и векторов φ_0 , φ_1

3. Спектральный анализ.

Теорема 4. Пусть выполнены условия (4), (5) и носители мер $d\mu(\tau)$, $d\eta(\tau)$ принадлежат отрезку $[d_0, d_1]$, $0 < d_0 < d_1 < +\infty$. Тогда существуют такие положительные числа R_0, Θ_0 , что спектр оператор-функции $L(\lambda)$ принадлежит множеству

$$\Omega := \{ \lambda \in \square : \operatorname{Re} \lambda < 0, |\lambda| < R_0 \} \cup \{ \lambda \in \square : \mu_0 < \operatorname{Re} \lambda < 0 \},$$

где $\mu_0 = -\mu - \Theta_0$, $R_0 = \max(d_1, \mu + \Theta_0)$, $\mu_0 = -\mu - \Theta_0$, $R_0 = \max(d_1, \mu + \Theta_0)$,

$$\mu = \frac{1}{2} \sup_{\|f\|=1} \frac{((K(0)A + Q(0)B)f, f)}{((A + B)f, f)}, \quad f \in D(A).$$

Замечание 1. Величина μ , фигурирующая в формулировке теоремы 3, допускает оценку

$$\mu \leq \frac{1}{2} \|A_0^{-1/2} (K(0)A + Q(0)B) A_0^{-1/2}\|.$$

Замечание 2. Согласно лемме 2.1 из работы [14] оператор $A^{-1/2} B A^{-1/2}$ допускает ограниченное замыкание в пространстве H . Отсюда следует, что оператор $A^{-1/2} A_0 A^{-1/2} = I + A^{-1/2} B A^{-1/2}$ допускает ограниченное замыкание

в H . В свою очередь, в силу упомянутой леммы 2.1 из работы [14] и, в силу самосопряженности оператора $A_0 = A + B$, операторы $A_0^{-1/2} A A_0^{-1/2}$, $A_0^{-1/2} B A_0^{-1/2}$ также допускают ограниченные замыкания в пространстве H .

Теорема 5. *Невещественный спектр оператор-функции $L(\lambda)$ симметричен относительно вещественной оси и состоит из собственных значений конечной алгебраической кратности, причем для любого $\varepsilon > 0$ в области*

$$\Omega_\varepsilon := \Omega \setminus \{ \lambda \in \mathbb{C} : -d_1 - \varepsilon < \operatorname{Re} \lambda < 0, |\operatorname{Im} \lambda| < \varepsilon \}$$

собственные значения являются изолированными, т.е. не имеют точек накопления.

В заключение отметим, что в нашей предшествующей работе [10] исследовалась корректная разрешимость задачи (1), (2), а также проводился спектральный анализ соответствующей оператор-функции в случае, когда ядра $K(t)$ и $Q(t)$ представимы в виде

$$K(t) = \sum_{k=1}^{\infty} a_k e^{-\gamma_k t}, \quad Q(t) = \sum_{k=1}^{\infty} b_k e^{-\gamma_k t}, \quad (11)$$

где коэффициенты $a_k > 0, b_k \geq 0, \gamma_{k+1} > \gamma_k > 0, k \in \mathbb{N}, \gamma_k \rightarrow +\infty, (k \rightarrow +\infty)$.

Список литературы

1. **Gurtin M.E., Pipkin A.C.** Arch. Rat. Mech. Anal. - 1968. – Vol.31. - P. 113 - 126.
2. **Ivanov S., Pandolfi L.** Journal of Mathematical analysis and applications. - 2009. – Vol.355. - P. 1 - 11.
3. **Като Т.** Теория возмущения линейных операторов. - М., "Мир", 1972.
4. **Korachevsky N. D., Krein S. G.** Operator approach to Linear // Problems of Hydrodynamics. Vol. 2. Nonselfadjoint Problems for Viscous Fluids. - Berlin: Basel-Boston, 2003.
5. **Лионс Ж. П., Мадженес Э.** Неоднородные граничные задачи и их приложения. - М. 1971.

6. **Лыков А.В.** Проблема тепло- и массообмена - Минск “Наука и техника”, 1976.
7. **Милославский А.И.** Спектральные свойства операторного пучка, возникающего в вязкоупругости. // Депонировано в Укр. НИИНТИ.13.07.87. №1229-УК87. Харьков. -1987. - С. 53.
8. **Власов В.В.,** Гавриков А.А., Иванов С.А., Князьков Д.Ю., Самарин В.А., Шамаев А.С. Современные проблемы математики и механики. - 2009. – Vol.5. - № 1. - С. 134 -155.
9. **Власов В.В.,** Раутиан Н.А. Современная математика. Фундаментальные направления. - 2015. – Vol. 58. - С. 22 - 42.
10. **Власов В.В.,** Раутиан Н.А. Труды семинара им. И. Г. Петровского. - 2011. – Т. 28. - С. 75 - 114.
11. **Власов В.В.,** Раутиан Н.А., Шамаев А. С. Современная математика. Фундаментальные направления. - 2011. – Т. 39. - С. 36 - 65.
12. **Власов В.В.,** Раутиан Н.А. Спектральный анализ функционально-дифференциальных уравнений. - М. МАКС Пресс, 2016. - 488 с. ISBN 978-5-317-05443-4;
13. **Шкаликов А.А.** Математический сборник. - 1988. – Т. 177. - №1. - С.96-118.
14. **Работнов Ю.Н.** Элементы наследственной механики твердых тел. - М. “Наука”, 1977.
15. **Ильюшин А.А.,** Победря Б.Е. Основы математической теории термовязкоупругости. - М. “Наука”, 1970. - 280 с.

Секция 2

НОВЫЕ МЕТОДЫ И ИНФОРМАЦИОННО-СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 681.5.08

З.М. Селиванова, К.В. Скоморохов
Z.M. Selivanova, K.V.Skomorokhov

ФГБОУ ВО "Тамбовский государственный технический университет",
г. Тамбов
Tambov State Technical University, Tambov

Селиванова Зоя Михайловна – д.т.н., профессор, профессор кафедры "Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; **Скоморохов Кирилл Викторович** – аспирант кафедры "Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем".

Selivanova Zoya Mikhailovna – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Design of Radio-electronic and Microprocessor Systems; **Skomorokhov Kirill Viktorovich** – Post-graduate student of the Department of Design of Radio-Electronic and Microprocessor Systems.

Определение теплофизических свойств твердых материалов в условиях неопределенности измерений

Determination of thermophysical properties of solid materials under conditions of measurement uncertainty

Ключевые слова: неопределенность измерений, точность определения теплофизических свойств, измерительная ситуация.

Keywords: measurement uncertainty, accuracy of determination of thermophysical properties, measurement situation.

Аннотация: предложен подход к оценке неопределенности измерений и его применение для повышения точности определения теплофизических свойств материалов различных диапазонов теплопроводности.

Abstract: an approach to assessing the measurement uncertainty and its application to improve the accuracy of determining the thermophysical properties of materials of various ranges of thermal conductivity is proposed.

При решении производственных задач в энергетике, строительстве, машиностроении и других отраслях промышленности широкое применение находят теплоизоляционные, композитные, полимерные материалы, которые характеризуются важными теплофизическими свойствами (ТФС) – теплопроводностью λ , температуропроводностью α и теплоемкостью c . Цель исследования – повышение точности определения ТФС материалов с различными диапазонами теплопроводности на основе использования результатов оценки неопределенности измерений, что является важной и актуальной задачей при повышении качества изготавливаемых материалов и изделий. Понятие неопределенности измерений и её оценка устанавливает Межгосударственный стандарт ГОСТ ISO/IEC 17025 – 2019 [1].

При неразрушающем контроле ТФС материалов неопределенность измерений определяется следующими факторами: несовершенством метода измерения ТФС, недостаточной точностью измерительных средств, воздействием влияющих факторов, неизвестной теплопроводностью и видом исследуемых материалов, влиянием длительности формируемых тепловых импульсов.

Для определения ТФС объектов исследования применяется импульсный метод линейного источника тепла. В основу метода положено решение двумерного уравнения теплопроводности для неограниченных тел в результате воздействия тепловыми импульсами на объект в течение заданного времени. Температуру при подаче n -ого импульса определяют по формуле [2]:

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

где Q – мощность источника тепла; F – значение частоты импульсов, x – расстояние между линейным источником тепла и точкой контроля; τ – время.

На основе формулы (1) с использованием измеренных значений температур $T(x, n)$ и $T(x, m)$ определены зависимости для расчета

параметров ТФС материалов – коэффициентов температуро проводности (a) и теплопроводности (λ):

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

где – B_1, B_2, B_3, B_4 – константы, определяемые при градуировке ИИИС, T_n, T_m – значения температуры при подаче, соответственно, n и m импульсов.

Полученные измерительные данные сохраняет в базе знаний интеллектуальная информационно-измерительная система (ИИИС), реализующая теплофизический метод измерения, и применяются при расчете ТФС материалов [2].

Результаты измерений коэффициентов a и λ (параметров ТФС) в условиях неопределенности представлены в виде ряда измеренных величин, которые включают предполагаемые значения измеряемого параметра на основе применения имеющихся сведений об исследуемом материале в базе знаний ИИИС с использованием вероятностного подхода, и величины, соответствующей неопределенности измерений. Формализованное описание измеряемой температуры в контактной области «Измерительный зонд-исследуемый материал» при проведении теплофизических измерений выполнено с использованием закона равномерного распределения возможных значений температуры в заданных интервалах (нижнем и верхнем) измеряемой величины для диапазонов теплопроводности $d1$ (0,02-0,2 Вт/мК), $d2$ (0,21-5,0 Вт/мК); $d3$ (0,51-10,0 Вт/мК):

$$[T_{jнд1}; T_{jвд1}], [T_{jнд2}; T_{jвд2}], [T_{jнд3}; T_{jвд3}],$$

где T_{jn} , $T_{jв}$ – нижнее и верхнее значения измеренных температур, соответственно, для диапазонов теплопроводности материалов $d1$, $d2$, $d3$.

Неопределенность измерения температуры $H(z_j)$ находится по зависимости:

$$H(z_j) = \frac{T_{jH} - T_{jB}}{2\sqrt{3}},$$

где z_j – оценка j -ой измеряемой величины [3].

Измеряемые параметры ТФС материалов $K_{\text{ТФС}}(\lambda, a, c)$ определяются по следующему уравнению измерений с учетом неопределенности измерений:

$$K_{\text{ТФС}} = L_{\text{ср}} + L_{\delta_{\text{ИК}}} + L_{\delta_{\text{ТФС}}},$$

где $L_{\text{ср}}$ – значение среднего арифметического количества измерений,

$L_{\text{ср}} = \frac{\sum_{j=1}^l L_j}{l}$, здесь l – число измерений, L_j – измеренное значение $K_{\text{ТФС}}$;

$L_{\delta_{\text{ИК}}}$ – поправка на погрешность измерительного канала ИИИС;

$L_{\text{ТФС}}$ – величина поправки, соответствующей допустимой погрешности измерений $K_{\text{ТФС}}$. Неопределенность измерений параметра $L_{\text{ср}}$ при нормальном распределении вероятностей устанавливается по зависимости [1]:

$$H(L_{\text{ср}}) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^l (L_j - L_{\text{ср}})^2}{l(l-1)}}.$$

Неопределенность допустимой погрешности измерений $L_{\delta_{\text{ТФС}}}$ при прямоугольном распределении вероятности в интервале $\pm\delta_{\text{ТФС}}$ будет равна:

$$H(L_{\delta_{\text{ТФС}}}) = \frac{\delta_{\text{ТФС}}}{\sqrt{3}}.$$

При прямоугольном распределении вероятности результата измерений $L_{\delta_{\text{ИК}}}$ в интервале $\pm\delta_{\text{ИК}}/2$ рассчитывается неопределенность измерительных данных:

$$H(L_{\delta_{\text{ИК}}}) = \frac{\delta_{\text{ИК}}}{2\sqrt{3}}.$$

Стандартная неопределенность параметров теплофизических свойств материалов $K_{\text{ТФС}}$ определяется по зависимости:

$$H(K_{\text{ТФС}}) = \sqrt{H^2(L_{\text{ср}}) + H^2(L_{\delta\text{ИК}}) + H^2(L_{\delta\text{ТФС}})}.$$

Предложенный подход для оценки неопределенности измерения ТФС материалов позволяет обеспечить достоверность определения температуры при проведении теплофизических измерений и повысить точность определения ТФС материалов с использованием результатов оценки неопределенности, что подтверждено результатами экспериментальных исследований ИИИС, функционирующей в условиях неопределенности.

Список литературы

1. **ГОСТ ISO/IEC 17025 – 2019.** Межгосударственный стандарт. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий (введен в действие Приказом Росстандарта от 15.07.2019 N 385-ст).

2. **Селиванова З.М.** Интеллектуальная информационно-измерительная система дистанционного контроля качественных параметров теплоизоляционных материалов в условиях воздействия дестабилизирующих факторов / З.М. Селиванова, Д.С. Куренков // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2020. – Т. 26, № 1 . – С. 6-19.

3. **Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: First edition – ISO,** Switzerland, 1993. – 101 pp.

**Абдужалилзода Фарзона¹, Тиллоева Т. Р.², Сафаров М.М.²
F. Abdujalilzoda¹, Tahmina R. Tilloeva², Mahmatali M. Safarov²**

¹Таджикский государственный педагогический университет им. С.Айни, Душанбе, Таджикистан; ²Таджикский технический университет имени акад. М.С. Осими, Душанбе, Таджикистан

¹Tajik developments pedagogical university by named S. Aini, Dushanbe, Tajikistan; ²Tajik technical university by named akad. M.S.Osimi, Dushanbe, Tajikistan

Абдужалилзода Фарзона - стр. преп. ТГПУ имени С.Айни, г. Душанбе; **Тиллоева Тахмина Рустамовна** - к.т.н. стр. преп. кафедры “Теплотехника и теплоэнергетика” ТТУ имени акад. М.С. Осими, г. Душанбе; **Сафаров Махмадали Махмадиевич** - д.т.н., профессор кафедры “Теплотехника и теплоэнергетика” ТТУ имени акад. М.С. Осими, г. Душанбе.

Abduzhalilzoda Farzona - St.. rev. S.Aini TSPU, Dushanbe; **Tilloeva Tahmina Rustamovna** - Ph.D. in Technical Sciences, St.. Department of "Heat Engineering and heat power Engineering" TTU named after M.S. Osimi, Dushanbe; **Makhmadali Makhmadievich Safarov** - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of "Heat Engineering and Heat Power Engineering" of the M.S. TTU. Osimi, Dushanbe.

Энергетическая установка для получения электрического тока и тепла

Power plant for obtaining electric current and heat

Ключевые слова: Энергетический установка, теплофизические характеристики, вода и метиловый спирт.

Аннотация: В работе приводится разработка, создание энергетическая установка одновременно для получения электрический постоянный ток и горячий воды. При разработке, моделирование и численных расчетов энергетической установки, также использованы всевозможные способы получение теплофизических характеристик теплоносителей системы водных растворов метилового спирта при различных температурах и давлениях.

Keywords: Power plant, thermophysical characteristics, water and methyl alcohol.

Abstract: The work presents the development, creation of a power plant simultaneously for receiving electric direct current and hot water. When developing, modeling and numerical calculations of the power plant, all possible methods were also used to obtain the thermophysical characteristics of the heat

carriers of the system of aqueous solutions of methyl alcohol at various temperatures and pressures.

Проблема использования солнечной энергии, которая являлась предметом изучения отдельных исследователей, сегодня привлекает пристальное внимание всей общественности (ученых, государственных деятелей, и т.д.). Это объясняется конечным запасом ископаемого топлива и заставляет задуматься над получением энергии будущего [1-5]. Кроме того, в последние годы остро встал вопрос о защите окружающей среды. Современная топливная энергетика загрязняет воздушный бассейн вредными выбросами, а также существует "тепловое загрязнение". Поэтому на современном этапе солнечная энергия является весьма перспективным энергоисточником. Если принять во внимание, что все виды энергии трансформируются, в конечном счете, в тепловую, то это может привести к необратимым изменениям теплового баланса и климата нашей планеты. По прогнозам тепловая энергия в количестве 57 от солнечной энергии может создать угрозу "теплового загрязнения". Несмотря на все преимущества солнечной энергии она не получила широкого применения даже в странах с жарким климатом. Объясняется это периодической облученностью в различные периоды времени, с техническими трудностями при преобразовании. Солнечная энергия практически вечный и потенциальный огромный источник энергоснабжения, не вносящий каких-либо загрязнений в окружающую среду. В наше время использование солнечной энергии в надвигающейся экологической катастрофе может помочь избежать значительных неприятностей с точки зрения охраны среды. Основные проблемы применения солнечной энергии это высокая стоимость конструкции при использовании, рассосредоточенность и дискретность поступления по часам суток, времени года и географическим поясам. Ключевой проблемой применения солнечной энергии является проблема аккумуляирования. Если рассосредоточенность излучения и необходимость создания устройства для концентрации определяются технико-

экономическими характеристиками используемых для этого систем, то дискретность поступления энергии требует решения вопросов аккумулирования.

Солнечная энергия является почти неограниченным источником, мощность которого оценивается в 20 миллиардов киловатт. Эта величина более чем в 100 раз превышает прогнозные значения требуемой электрической мощности для планеты в целом на уровне 2000 года. Годовой приход солнечной энергии эквивалентен $1,3 \cdot 10^{14}$ тоннам условного топлива. Для сравнения - мировые запасы органического топлива оцениваются в $6 \cdot 10^{12}$ тонн условного топлива. Наибольший интерес представляет преобразование солнечной энергии в электрическую или тепловую. КПД большинства этих установок чрезвычайно низок, но, тем не менее, перспективы применения весьма заманчивы. Даже при КПД 5% солнечной энергии, собранной с 6 м^2 горизонтальной поверхности в тропических районах, достаточно для удовлетворения энергетической потребности на душу населения на современном уровне развития. Для этих целей можно использовать обширные неосвоенные пространства, не принося ущерба сельскому хозяйству.

Специалистам в области теплоснабжения в недалеком будущем придётся сталкиваться с различными системами, создаваемыми на базе нетрадиционных топлив, одним из которых является солнечное излучение. Солнечная радиация - практически неисчерпаемый и экологически чистый источник энергии. Мощность потока солнечной энергии у верхней границы атмосферы равна $1,7 \cdot 10^{14}$ кВт, а на поверхности Земли - $1,2 \cdot 10^{14}$ кВт. Общее годовое количество поступающей на Землю солнечной энергии составляет $1,05 \cdot 10^{18}$ кВт·ч, в том числе на поверхность суши приходится $2 \cdot 10^{17}$ кВт·ч. Без ущерба для экологической среды может быть использовано до 1,5% всей поступающей солнечной энергии. Среднесуточная интенсивность потока солнечного излучения равна 210 - 250 Вт/м² [18-21,2 МДж/(м²сут)] в тропических зонах и пустынях, 130-210 Вт/м² [10,8-18МДж/(м²сут)] в

центральной части России и $80 - 130 \text{ Вт/м}^2$ [$7,2-10,8 \text{ МДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$] на Севере России, а максимальная величина достигает 1000 Вт/м^2 . Число часов солнечного сияния в год в странах Средней Азии составляет 2700 -3035, в Закавказье 2130 - 2520, на Украине и в Молдавии 2000 - 2080. Количество солнечной энергии, поступающей за год на 1 м^3 горизонтальной поверхности, в Ашхабаде равно 1720 кВтч., в Одессе 1345 кВтч, в Душанбе 2039 кВтч и в Москве 1015 кВтч. С помощью гелиотехнических устройств может быть полезно использовано 10 -50%. Все проблемы, существующие в мире в области энергообеспечения и энергетики в целом, не чужды и республике Таджикистан.

Системы теплоснабжения и электрофикации зданий и сооружений являются одними из наиболее энергоемких потребителей топливно-энергетических ресурсов в Таджикистане. «Энергетической стратегией Республики Таджикистан на период до 2030 года» предусмотрен рост значения возобновляемых источников энергии в обеспечении энергетических потребностей общества; формирование долгосрочной политики развития возобновляемых источников энергии. К стратегическим целям использования возобновляемых источников энергии и местных видов топлива относится вовлечение в топливноэнергетический баланс дополнительных топливноэнергетических ресурсов. Важное условие эффективного и устойчивого ведения сельского хозяйства, а также закрепления населения в сельской местности – стабильное и надежное обеспечение электрической энергией и эффективными системами теплоснабжения взамен традиционных отопительных печей и неэффективных малых котельных.

Целью настоящей работы является исследование энергетической эффективности работы теплонасосных систем отопления и получение данных на базе экспериментального исследования теплофизических свойств теплоносителей водных растворов метилового спирта (метилловый спирт+нанопорошок серебра) в интервале температур (293-343) К и давлений

(0,101-49,01) МПа, а также создание и разработка солнечных коллекторов нового типа, позволяющих одновременное получение электроэнергии и горячей воды.

- обосновать возможность применения экспериментальных установок для исследования теплофизических свойств исследуемых растворов;

- выполнить комплексное исследование теплопроводности, удельной теплоемкости, температуропроводности и плотности от температуры, а также численным методом получить коэффициенты температуропроводности и теплопроводности, пригодные для использования в качестве табличных характеристик исследованных материалов;

- обобщение и обработка экспериментальных данных теплоносителей солнечных коллекторов нового поколения;

- оценить параметры пространственно-временного распределения потенциала возобновляемого тепла, доступного для целей теплоснабжения и электроснабжения, разработать методику для комплексной оценки влияния параметров климата и характеристик тепловой защиты внешней оболочки зданий;

- построение математической модели ёмкостной солнечной водонагревательной установки (СВУ);

- провести анализ энергетической эффективности систем теплоснабжения с коллектором нового типа, позволяющий одновременное получение тепло- и электроэнергии на основе натуральных испытаний.

В присутствии воздуха при $T=170^{\circ}\text{C}$ серебро переходит в Ag_2O , при воздействии озона Ag_2O_2 и Ag_2O_3 . Серебро можно растворить в теплой концентрированной серной и в азотной кислотах, в йода- и бром водородной кислотах. Итогами реакции является образование комплексных галогенидов серебра. Относительно других материалов серебро обладает наибольшей тепло- и электропроводностью и наибольшей отражательной способностью (95% в оранжевой области спектра). Серебро относится к числу

диамагнитных металлов с положительной абсолютной ЭДС. При $T=0-900^{\circ}\text{C}$ э.д.с. выражается уравнением:

$$E = 1,42 + 0,00338 \cdot t + 0,000008 \cdot t^2 \quad (1)$$

где, t – температура, $^{\circ}\text{C}$. Все эти свойства делают серебро востребованным в электротехнике, электронике, приборостроении, медицине, ракетостроении, для производства монет, памятных и ювелирных изделий. Стабилизирующие вещества в растворе предназначены для предотвращения самопроизвольного увеличения частиц коллоида, т.е. агрегации частиц. Коллоидные частицы получают методом конденсации и путем диспергирования. Коллоидные растворы (золи) способны рассеивать свет (эффект Тин Даля). При пропускании пучка света через коллоидный раствор после него образуется конус, который можно наблюдать в темноте, таким образом, отличая его от истинного. Было выявлено, что частицы в коллоидном растворе обладают зарядом одного и того же знака, поэтому они и не слипаются, а заряд они приобретают в результате адсорбции ионов из раствора. У лиофоб-ных коллоидов очень высокая поверхностная энергия, в связи с чем они объединяются в более крупные частицы. Однако путем создания двойного электрического слоя, снижающего поверхностную энергию частицы, можно избежать их слипания. Коллоидным частицам также свойственен процесс седиментации (всплытие, осаждение частиц). Этому процессу оказывает ответное действие, которое за счет броуновского движения частиц способствует равномерному распределению этих частиц повсему объему среды. Для получения коллоидного водного раствора применяют деионизированную (деминерализованную) воду, т.е. из ее состава удаляются нитраты, минералы, кальций, магний и тяжелые металлы кадмий, барий, свинец, ртуть и некоторые соединения радия. В таблице 1 представлены некоторые свойства воды.

Таблица 1. Физические свойства воды при атмосферном давлении.

t^0 С	$p \cdot 10^{-5}$, Па	ρ , кг/м ³	h , кДж/ (кг·К)	C_p , Дж/ (кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/м·К)	$\alpha \cdot 10^8$, м ² /с	$\mu \cdot 10^6$, Па·с	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	$\beta \cdot 10^4$, К ⁻¹	$\sigma \cdot 10^4$, Н/м	Pr
0	1,0133	999,9	0	4212	56,9	13,2	1788	1,789	-0,63	756,4	13,5
10	1,0133	999,7	42,04	4191	57,4	13,7	1306	1,306	0,7	741,6	9,52
20	1,0133	998,2	83,91	4183	59,9	14,3	1004	1,006	1,82	726,9	7,02
30	1,0133	995,7	125,7	4174	61,8	14,9	801,5	0,805	3,21	712,2	5,42
40	1,0133	992,2	167,5	4174	63,5	15,3	653,3	0,659	3,87	696,5	4,31
50	1,0133	988,1	209,3	4174	64,8	15,7	549,	0,556	4,49	676,9	3,54
60	1,0133	983,2	251,1	4179	65,9	16,0	469,9	0,478	5,11	662,2	2,93
70	1,0133	977,8	293,0	4187	66,8	16,3	406,1	0,415	5,70	643,5	2,55
80	1,0133	971,8	335,0	4195	67,4	16,6	355,1	0,365	6,32	625,9	2,21
90	1,0133	965,3	377,0	4208	68,0	16,8	314,9	0,326	6,92	607,2	1,95

Изобретение, представленное в данной работе относится к гелиоэнергетической технике. Данное изобретение нашло свое применение в целях удовлетворения потребительских нужд в тепло- и электроэнергии, работа которого основано на преобразовании солнечной радиации (Патент республики Таджикистан № TJ919).

Существующая установка горячего водоснабжения [1] состоит из гелиоприемника, содержащего не менее двух коллекторов преобразования солнечной энергии, бака-аккумулятора, патрубков подачи холодной воды и отбора горячей.

Главными и одними из основных недостатков на сегодняшний день является то, что устройство предполагает значительные металло- и материалоемкость и для установки требуются большие площади и конструкции соответствующей сложности.

Таким образом, учитывая перечисленные недостатки, главным приоритетным направлением и целью предлагаемого изобретения является

разработка устройства комбинированной выработки электро- и теплоэнергии на базе более упрощенной по своей конструкции и более миниатюризированной с соответственными затратами солнечной установки.

Емкость 1, изготовленная из алюминия и покрашенная краской серебряного цвета с горловиной 2, имеющей вентиль и патрубком 3 для слива жидкости составляют основные элементы предлагаемой установки. Емкость на 1/3 заполняется жидкостью 4, способной аккумулировать тепло (в нашем случае водный раствор метилового спирта). Внутри этой емкости (бак-аккумулятор) установлен змеевик 5, входной 6 и выходной 7 патрубки которого заделаны с ее торцевой стенки. С помощью входного патрубка в аккумулятор посредством змеевика подается холодная вода, которая протекая по змеевику нагревается и с помощью патрубка 7 отбирается для потребительских нужд. В электрической цепи устройства используются два нановольтамперметра (тестера) 8 модели UT71A/B/C/D/E. К одному из них соединены одни концы односпайной (хромель-алюмелевой) термопары 9, а другие к точке крепления 10, расположенной на стенке емкости 1. Концы другой дифференциальной хромель-алюмелевой термопары 11 присоединены ко второму тестеру, а вторые концы термопары соединены к точке крепления 10 на емкости 1 и 12 на алюминиевой пластине 13 соответственно. Полупроводник термопары 11, изготовленный из алюминия служит для соединения контактных точек 10 и 12. К выходу второго тестера посредством ключа 14 – с одной стороны и нагрузки 15 - с другой стороны соединен аккумулятор 16, в котором собственно и осуществляется накопление электроэнергии.

Измерения температуры, силы тока и напряжения емкости 1 и пластины 13 применяются нановольтамперметры 8, а люксметр 17 служит для измерения солнечной радиации.

Установка, описанная выше, работает так: через горловину 2 в емкость 1 с осеребренной поверхностью до 1/3 ее объема заливается теплоаккумулирующая жидкость 4 и устанавливается под прямыми

солнечными лучами, под воздействием которых емкость с теплоаккумулирующей жидкостью и змеевиком 5 внутри нее нагреваются. Холодная вода, поступающая в змеевик через патрубок 6, протекая через него, соответственно нагревается и посредством патрубка 7 подается на потребительские нужды. Наряду с нагревом емкости с ее содержимым, нагревается и контактная точка 10 на ее поверхности, а поскольку контактная точка 12 на пластине 13 находится в холодном состоянии, начинает срабатывать эффект Петле, т.е. в результате возникновения разности температур в термопарах 9 и 11 появляется термо э.д.с., которая способствует возникновению электрического тока напряжением 12 V и силой 30 mA. Ключ 14 замыкается и ток через нагрузку 15 поступает для аккумуляции в аккумулятор 16, а от него на потребительские нужды.

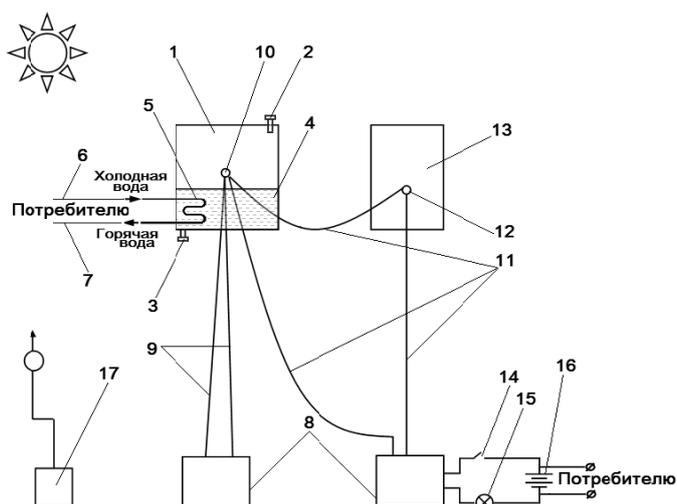


Рис. 1 - Схема солнечного коллектора для получения электрической энергии и тепла.

Применив преобразователь в данном случае, постоянный электрический ток можно преобразовать в переменный электрический ток, напряжение которого составляет 220 В, а частота ~50 Гц.

Практически представленное изобретение апробировано на примере опытного стенда. Для установления максимально эффективного времени года относительно применения данной установки исследования были проведены в три этапа с охватом трех месяцев (июль, август, октябрь).

Схематическое изображение установки представлено на рисунке 2. На протяжении всего дня (светлое время суток), через каждые 30 мин, нановольтамперметрами 8 измерялись: температура емкости 1, пластины 13, силу и напряжение возникающего электрического тока в контактной точке 10. Наряду с этими параметрами с помощью люксметра 17 измеряли солнечную радиацию (освещенность).

Результаты полученных данных эксперимента приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Зависимость изменений температуры ёмкости (накопителя тепла) и алюминиевой пластины при различном времени проведения эксперимента.

№	Время года	Дата и время	Температура емкости, °С	Температура алюминиевой пластины	Температура емкости и алюминиевой пластины вместе	Интервал времени измерений
1.	Июль	31.07.2017, 13 ⁰⁰ - 13 ³⁰	74,0	31,8	60,0	9 ⁰⁰ - 18 ⁰⁰
2.	Август	25.08.2017, 11 ⁰⁰ - 11 ³⁰	73,6	31,8	58,6	9 ⁰⁰ - 18 ⁰⁰
3.	Октябрь	30.10.2017, 11 ³⁰ - 12 ⁰⁰	53,3	26,0	52,5	9 ⁰⁰ - 17 ³⁰

Таблица 3 -Зависимость изменение температуры от времени (τ, час) нагрева раскрашенных пластин (с июля 2017 до июля 2018 г.).

№	Время года	Температура емкости, °С	Интервал времени измерений, час
1	Июль	57,4	9 ⁰⁰ - 18 ⁰⁰
2	Август	54,7	9 ⁰⁰ - 18 ⁰⁰
3	Октябрь	47,2	9 ⁰⁰ - 17 ³⁰
4	Декабрь	16,0	9 ⁰⁰ - 18 ⁰⁰
5	Январь	22,3	9 ⁰⁰ - 18 ⁰⁰
6	Февраль	26,1	9 ⁰⁰ - 17 ³⁰
7	Март	30,0	9 ⁰⁰ - 18 ⁰⁰
8	Апрель	33,1	9 ⁰⁰ - 18 ⁰⁰
9	Май	39,3	9 ⁰⁰ - 17 ³⁰

10	Июнь	57,0	$9^{00} - 18^{00}$
11	Июль	61,8	$9^{00} - 18^{00}$

Таблица 4 - Экспериментальные данные поверхностного натяжения метилового спирта+ массовой концентраций воды.

Растворы	Массовые концентрации исследуемых растворов	α , Н/м водных
Образец №1	100%CH ₄ O	0,020
Образец №2	80%CH ₄ O+20%H ₂ O	0,023
Образец №3	60%CH ₄ O+ 40%H ₂ O	0,026
Образец №4	40%CH ₄ O+ 60%H ₂ O	0,030
Образец №5	20%CH ₄ O+ 80%H ₂ O	0,036
Образец №6	100%H ₂ O	0,073
Полученные итоги	опытно-расчетных параметров	комплекса

исследованных ТФС, а также представленная математическая модель изменения этих свойств способствует колоссальному снижению не только объема дорогостоящих экспериментов, но и капиталовложения на приобретения соответствующего оборудования, а полученные результаты позволили заложить основу для конструирования новых материалов, двигателей летательных аппаратов (ЖРД).

Список литературы

1. **Бринкворт Б.Дж.** Солнечная энергия для человека: М.: Мир, 1976. 278 с.
2. **Берковский Б.М., Кузьмин В. А.** Возобновляемые источники энергии на службе человека. М.: Наука, 1987. 125 с.
3. **Богословский В.Н.** Энергия окружающей среды и строительное проектирование. М.: Стройиздат, 1983. 125 с.
4. **Даф Дж. А., Бекман У.А.** Тепловые процессы с использованием солнечной энергии. М: Мир, 1971. 420 с.
5. **Кириллин В.А.** Энергетика. Главные проблемы. М.: Знание, 1990. 121 с.

Давлатшоев С.К., Сафаров М.М.
Davlatshoev S.K., Safarov M.M.

Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАНТ, г. Душанбе
Таджикский технический университет им. ак. М.С. Осими, г. Душанбе
Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology, NAST, Dushanbe
Tajik Technical University named after ac. M.S. Osimi, Dushanbe

Давлатшоев Саломат Каноатшоевич – к.т.н. заведующий лаборатории «Энергетика, ресурсо- и энергосбережения» Института водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАНТ; **Сафаров Махмадали Махмадиевич** - д.т.н., профессор, Таджикский технический университет им. ак. М.С. Осими.

Davlatshoev Salomat Kanoatshoevich - Ph.D. head of the laboratory "Energy, resource- and energy saving" Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology NAST; **Safarov Makhmadali Makhmadievich** - Doctor of Technical Sciences, Professor, Tajik Technical University named after ac. M.S. Osimi.

**Термометр - тепломер для определения пути сосредоточенной
фильтрации в основании плотины**

**Thermometer - heat meter for determining the path of concentrated
filtration at the base of the dam**

Ключевые слова: термометр-тепломер; сосредоточенная фильтрация; погружной зонд; тепловые потоки.

Аннотация: Рассмотрено разработка термометра-тепломера для определения пути сосредоточенной фильтрации в основании плотины.

Key words: thermometer-heat meter; concentrated filtration; submersible probe; heat flows.

Abstract: The development of a thermometer-heat meter for determining the path of concentrated filtration at the base of the dam is considered.

В основании плотины Рогунской ГЭС залегает пласт каменной соли. Анализ строительства и эксплуатации ГЭС на водорастворимых основаниях показывает, что отсутствие мониторинга за гидрогеохимическим режимом, фильтрационными потоками и надлежащих защитных мероприятий может привести к нарушениям нормальной эксплуатации сооружения и риск появления чрезвычайной ситуации [1-3].

Для определения пути сосредоточенной фильтрации в основание и бортам плотины специалистами ООО «Гидроспецпроект» города Рогуна и ООО «NELT» города Душанбе была разработана термометр-тепломер. Термометр-тепломер предназначен для высокоточного измерения температуры и тепловых потоков в "сухих" инженерно-геологических скважинах, или заполненных водой [4, 5].

Этот прибор позволяет использовать только один двухканальный зонд, резко повысить производительность термометрии "сухих" скважин, увеличить точность регистрации температуры, измерять температуру в любой интересующей точке, создать необходимые условия сканирования всей скважины, или наблюдения процессов фильтрации подземных вод на любой выбранной глубине.

Конструкция также обеспечивает малую постоянную времени термодатчиков в сочетании с механической защищенностью. Дифференциальная чувствительность прибора позволяет уверенно обнаруживать перепады (градиент) температур в водной среде на уровне $0,00010\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{см}$.

Конструкция термометра-тепломера позволяет измерять вертикальные тепловые потоки исходя из найденного градиента dT/dz . Кроме числовых данных, в процессе измерений строится «онлайн» термограмма, которая позволяет оператору сразу обнаружить возможные температурные аномалии.

Термометр-тепломер состоит из следующих частей (рис. 1): погружной зонд, сигнальный кабель, катушка для намотки кабеля, кожух для хранения погружного зонда, совмещённый с катушкой, радиопередатчик сигнала с погружного зонда, встроенный в катушку, регистратор, радиоприёмник сигнала с погружного зонда.

Питается погружной зонд от трёх щелочных батареек формата AA размещённых также внутри катушки.

Погружной зонд (рис. 2) состоит отрезка прочной пластиковой трубы 1, заглушенной с обоих концов стальными заглушками 3 и 4. Стальная

заглушка 3 имеет сквозное отверстие для кабеля, заглушка 4 наглухо закрыта. В отрезок пластиковой трубы 2 помещены два термодатчика 2. Оба датчика залиты эпоксидной смолой с целью их гидроизоляции. Электронная часть погружного зонда расположена внутри катушки для намотки кабеля.



Рис. 1. Комплектация термометра.

Регистратор соединяется с зондом по радиоканалу через приёмный радиомодуль подключенный к USB порту компьютера. Чтобы радиомодуль заработал и начал принимать сигналы с зонда, на компьютере должны быть установлены драйвер радиомодуля и специализированная программа термометра. Зона действия радиомодуля составляет порядка 100 м при условии прямой видимости.

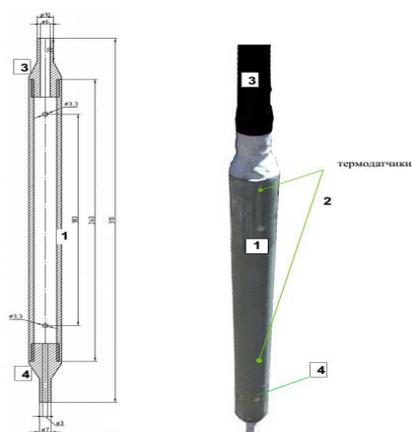


Рис. 2. Погружной зонд.

Список литературы

1. **Гарелина С.А., Давлатшоев, С.К., Латышенко, К.П.** Повышение безопасности гидротехнических сооружений. Часть 1. На примере Рогунской ГЭС на реке Вахш. – Химки: АГЗ МЧС России, 2021. – 159 с.
2. **Гарелина С.А., Давлатшоев, С.К., Сафаров М.М.** Система мониторинга защиты пласта соли основания плотины Рогунской ГЭС // Общенаучные проблемы подготовки инженерных кадров МЧС РФ: сборник трудов XXVIII Международной научно-практической конференции. – Химки: АГЗ МЧС России, 2018. – С. 26-29.
3. **Гарелина С.А., Давлатшоев С.К., Сафаров М.М.** Система защиты солевого пласта плотины Рогунской ГЭС // IX Всеросс. Н.-практ. Конф. «Пожарная безопасность: проблемы и перспективы». – Воронеж: ВФ ИПСА ГПС МЧС России, 2018. – С. 135-138.
4. **Давлатшоев С.К., Кобулиев З.В., Сафаров М.М.** Автоматизированная система мониторинга основания плотины на легкорастворимых породах // Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ. Сборник трудов V Международной научно-технической конференции. – СПб.: Университет ИТМО, 2019. – С. 257-282.
5. **Давлатшоев С.К., Кобулиев З.В., Сафаров М.М.** Измерения диапазон изменения температурного поля во времени в основание плотины Рогунской ГЭС // Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ. Сборник трудов V Международной научно-технической конференции. – СПб.: Университет ИТМО, 2019. – С. 292-300.

Махмадали Махмадиевич Сафаров¹, Саиджафар Сафаралиевич Джумаев², Масрур Мирзохонович Гуломов², Тахмина Рустамовна Тиллоева¹, Умарализода Мансури Умарали²
Mahmadali M. Safarov¹, Saidjafar S. Jumayev², Masrur M. Gulomov², Tahmina R. Tilloeva¹, Umaralizoda M. Umarali²

¹Таджикский технический университет имени акад. М.С.Осими, Душанбе, Таджикистан; ²Таджикский государственный педагогический университет им. С.Айни, Душанбе, Таджикистан

¹Tajik technical university by named akad. M.S. Osimi, Dushanbe, Tajikistan;

²Tajik developments pedagogical university by named S.Aini, Dushanbe, Tajikistan

Сафаров Махмадали Махмадиевич - д.т.н., профессор кафедры “Теплотехника и теплоэнергетика” ТТУ имени акад. М.С. Осими, г. Душанбе; **Джумаев Саиджафар Сафаралиевич** – аспирант кафедры “Общая физика” ТГПУ имени С. Айни, г. Душанбе; **Гуломов Масрур Мирзохонович** – к.т.н кафедры “Общая физика” ТГПУ имени С. Айни, г. Душанбе; **Тиллоева Тахмина Рустамовна** - к.т.н., стр. преп. кафедры “Теплотехника и тепло-энергетика” ТТУ имени акад. М.С. Осими, г. Душанбе; **Умарализода Мансури Умарали** - стр. преп. кафедры “Информатики” ТГПУ имени С. Айни, г. Душанбе.

Makhmadali Makhmadievich Safarov - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of "Heat Engineering and Heat Power Engineering" of M.S. Akad. Osimi, g. Dushanbe; **Dzhumaev Saijafar Safaralievich** - postgraduate student of the Department of "General Physics" of S. Aini TSPU, Dushanbe; **Gulomov Masrur Mirzokhonovich** - Candidate of Technical Sciences of the Department of "General Physics" of S. Aini TSPU, Dushanbe; **Tilloeva Tahmina Rustamovna** - Candidate of Technical Sciences, p. Rev. Department of "Heat Engineering and heat-power engineering" of the TTU named after M.S. Osimi, Dushanbe; **Umaralizoda Mansuri Umarali** - p. Rev. Department of "Informatics" of S. Aini TSPU, Dushanbe.

Влияние (Осунт, Мсунт) на изменение теплоемкости изобутана при различных температурах и давлениях

Influence nanotubes toexchanch capacity isobutene at the temperature, pressures

Ключевые слова: ОСУНТ и МСУНТ, изобутан, теплоемкость, концентрация, температура и давления.

Аннотация: В статье приводятся результаты экспериментального исследования теплоемкости хладагента на основе изобутана в зависимости от

температуры, давления и концентрации нанотрубок (ОСУНТ и МСУНТ). Результаты исследования показали, что добавки ОСУНТ и МСУНТ в изобутан увеличивает их теплоемкость коллоидных растворов во всем изменение параметров состояния. Общая относительная погрешность измерения удельное изобарное теплоемкости составляют 3,3% соответственно при доверительной вероятности 0,95. На основе данных по теплоемкости коллоидных растворов получены эмпирические уравнения.

Keywords: carbonnanotubes, capacity, isobutene, concentration, temperature, pressures.

Abstract: The article presents the results of an experimental study of the heat capacity of a refrigerant based on isobutane depending on the temperature, pressure and concentration of nanotubes (SWCNT and MWCNT). The results of the study showed that the addition of SWCNTs and MWCNTs to isobutane increases their heat capacity of colloidal solutions throughout the change in state parameters. The general relative measurement error of the specific isobaric heat capacity is 3.3%, respectively, with a confidence level of 0.95. Empirical equations are obtained on the basis of data on the heat capacity of colloidal solutions.

Объект исследования – хладагент на основе изобутана с учетом их изменение концентрации углеродных нанотрубок ОСУНТ и МСУНТ. Образцы визготавливались методом смешения. Средний размер фракции для углеродных нанотрубок составляет 50 нм.

Цель данной работы: выполнение экспериментов и получение данных по теплоемкости системы газообразный, жидких изобутана и одностенных и многостенных углеродных нанотрубок (до 2,5 %) в интервале температур (280-630) К и давлений (0,101-49,01) МПа.

Исследование термодинамических свойств технически важных композиционных материалов (и их коллоидных растворов) в жидкой фазе в широком интервале температур (280-630) К и давлений (0,101-49,01) МПа, имеет большое научное и прикладное значение.

Получение экспериментальных значений теплоемкости, коллоидных растворов на основе изобутана, как в чистом виде, так и содержащей различное количество углеродных нанотрубок аморфном состоянии в интервале температур (280-630) К и давлений (0,101-49,01) МПа, концентрации содержащегося металла и рода углеродного наполнителя (ОСУНТ и МСУНТ).

Методология и методы исследования – для выполнения данной работы использовали метод монотонного разогрева (теплоемкость установки профессоров Е.С. Платунов и М.М. Сафарова) при различных температурах и обработка экспериментальных данных (метод наименьших квадратов (компьютерная программа Excell и Сигма Plote).

Методы монотонного теплового режима основываются на закономерностях приближенного анализа нелинейного уравнения теплопереноса. При этом под монотонным тепловым режимом понимается плавный разогрев (охлаждение) тела в широком диапазоне измерения температуры со слабо - переменным полем скоростей внутри образца [1, 2]. Эти методы являются обобщением квазистационарных методов на случай переменных теплофизических параметров [$\lambda = \lambda(t); a = a(t); c\rho = c\rho(t)$] и скорости нагревания (охлаждения) $b = f(x, \tau)$. Они позволяют из одного опыта получить температурную зависимость исследуемого свойства и носят название динамических методов.

Метод монотонного разогрева используется для измерения теплопроводности, теплоемкости и температуропроводности жидкостей, растворов, твердых тел, сыпучих материалов и др. [1, 2]. Установка для исследования методом монотонного разогрева и ее тепловая схема показаны в работе. Медная ячейка с исследуемым образцом, пластина контактная и стержень монотонно разогреваются тепловым потоком, $Q(t)$ поступающим от основания. Боковые поверхности стержня, медная ячейка с исследуемым образцом, пластины адиабатически изолированы. Стержень и пластина контактная изготовлены из меди, обладающей высокой теплопроводностью, поэтому перепады температур на них незначительны [1, 2]. Для численных расчетов эффективности энергоустановки необходимо знать, что при составлении математической модели необходимо иметь значение теплопроводности, плотности и изобарную теплоемкость чистого жидкого изобутана при различных температурах и давлениях, а также с добавкой углеродных нанотрубок *ОСУНТа* и *МСУНТа*.

Коэффициент эффективности теплоносителей системы изобутан и фуллерены рассчитан следующей формулой (1), зная теплофизические характеристики хладагентов:

$$K_{эфф} = \sqrt{C_p \rho \lambda}, \frac{Вт\sqrt{с}}{М^2К} \quad (1)$$

где, C_p - удельная теплоёмкость $\frac{Дж}{(кг К)}$; ρ - плотность, $кг/м^3$; λ - теплопроводность, $Вт/(м \cdot К)$.

Результаты численных расчётов по коэффициенту активности исследуемых коллоидных растворов системы углеводородных жидкостей изобутана и углеродных нано-трубок *ОСУНТ* и *МСУНТ* представлены в таблице 1.

Таблица 1. Удельная изобарная теплоемкость (C_p , Дж/(кг·К)) системы х.ч. (изобутан (2-метилпропан) от концентрации углеродных наночастиц после истечение 50 часов при раз-личных температурах и давлениях.

Т, К 1	Давление Р, МПа					
	2	3	4	5	6	7
	0,101	9,81	19,62	29,43	39,24	49,01
Образец №1 -х.ч. (изобутан (2-метилпропан) без добавки углеродных одностенных нанотрубок						
293	1618	1560	1535	1490	1435	1405
333	1790	1715	1690	1630	1565	1546
353	1872	1800	1760	1700	1645	1620
393	2090	1980	1930	1865	1806	1760
413	2186	2040	2006	1940	1885	1846
433	2270	2135	2090	2015	1958	1935
453	2356	2212	2170	2090	2040	2003
473	2440	2300	2250	2165	2120	2070
493	2575	2400	2335	2242	2200	2150
513	2618	2470	2400	2320	2285	2238
533	2680	2540	2480	2390	2350	2300
553	2765	2625	2550	2475	2425	2366
573	2835	2700	2635	2545	2484	2428
593	2920	2770	2700	2610	2550	2480
653	3130	2940	2900	2795	2710	2640
673	3170	3015	2940	2836	270	2670
693	3215	3065	2985	2878	2814	2715
Образец №6-х.ч. (изобутан (2-метилпропан) +2,5% одностенныхуглеродныхнанотрубок)						

293	2560	2510	2390	2336	2275	2185
313	2645	2550	2430	2376	2320	2229
333	2726	2630	2500	2450	2375	2300
353	2800	2700	2576	2524	2440	2368
393	2970	2840	2700	2660	2630	2490
413	3040	2890	2750	2725	2670	2576
453	3205	3030	2875	2850	2760	2700
473	3286	3116	2940	2910	2830	2764
493	3375	3180	3036	2985	2889	2835
513	3450	3250	3100	3060	2950	2900
553	3620	3380	3250	3180	3075	3034
613	3820	3610	3490	3360	3250	3179
633	3880	3660	3540	3408	3300	3234
673	3970	3790	3640	3486	3400	3305
693	4010	3886	3730	3510	3440	3326

Как видно из таблицы 1, с повышением температуры (293-693) К удельная теплоемкость растет по линейному закону.

Для определения вклада ОСУНТ и МСУНТ с их концентрацией (0,1 - 0,5) % масс., введённых в жидкий чистый изобутан, на изменение его удельной изобарной теплоёмкости при различных давлениях и температурах были найдены относительные коэффициенты, т.е. зависимости в виде отношений [3] уравнение (2 и 3):

$$K_{Cp}(T) = C_p^{\phi} / C_p^0 = f(T); \quad (2)$$

$$K_{Cp}(p) = C_p^{\phi} / C_p^0 = f(p), \quad (3)$$

где $K_{Cp}(T)$ - относительный коэффициент изменения удельной изобарной теплоёмкости системы «(изобутана+ОСУНТ и МСУНТ)/изобутан» при изменении температуры (Т) и постоянном давлении (р); $K_{Cp}(p)$ - относительный коэффициент изменения удельной изобарной теплоёмкости системы «(изобутан+углеродныенанотрубки)/изобутан» при изменении давления (р) и постоянной температуре (Т); C_p^{ϕ} - удельная изобарная теплоёмкость жидкого чистого изобутана с внедрёнными углеродный

нанотрубок (ОСУНТ и МСУНТ) при их концентрации (0,1 - 0,5) % масс.; C_p^0 - удельная изобарная теплоёмкость жидкого чистого изобутана (без внедрения фуллеренов) (таблица 2).

Таблица 2 - Относительные коэффициенты удельной изобарной теплоемкости системы «(изобутан+углеродные нанотрубки)/изобутан» (после истечение 50 часов)при различных давлениях и температурах.

Т, К	$K_{Cp}(T); K_{Cp}(p)$	
	$K_{Cp}(T)$ (0,5 % ОСУНТ); $K_{Cp}(p)$ (0,5 % ОСУНТ)	$K_{Cp}(T)$ (0,5 % МСУНТ); $K_{Cp}(p)$ (0,5 % МСУНТ)
p = 0,101МПа		
293	1,582	1,611
313	1,556	1,585
333	1,523	1,554
353	1,495	1,524
373	1,449	1,478
p = 4,91МПа		
293	1,570	1,599
333	1,545	1,574
353	1,498	1,527
433	1,455	1,481
533	1,420	1,449
593	1,314	1,343
p = 9,81МПа		
293	1,612	1,641
333	1,534	1,564
353	1,500	1,529
433	1,405	1,040
533	1,299	1,434
593	1,297	1,326
p = 19,62МПа		
293	1,557	1,586
333	1,479	1,508
373	1,456	1,485
433	1,368	1,397
533	1,283	1,312
593	1,272	1,301
p = 29,43МПа		
293	1,570	1,599
333	1,513	1,542
373	1,493	1,522
433	1,376	1,405

533	1,330	1,359
593	1,311	1,340
p = 39,24МПа		
293	1,584	1,613
333	1,548	1,577
373	1,528	1,557
433	1,384	1,412
533	1,378	1,407
593	1,349	1,375
p = 49,01МПа		
293	1,602	1,631
333	1,566	1,595
373	1,548	1,577
433	1,401	1,430
533	1,348	1,377
593	1,329	1,358

Список литературы

1. **Буравой С.Е., Платунов Е.С., Курепин В.В.** Перспективы исследования теплофизических свойств методами монотонного режима // Материалы 5 Международной теплофизической школы. 20-24 сентября 2004 г. Часть 1. Тамбов, Изд. ТГТУ.- С. 66-74.
2. **Теплофизические измерения и приборы** / Е.С. Платунов, С.Е. Буравой, В.В. Курепин, Г.С. Петров; Под общ. ред. Е.С. Платунова. - Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд., Л., 1978. - 708 с.
3. **Давлатов Н.Б.** Влияние фуллеренов на изменение теплофизических и термодинамических свойств жидкого гидразина. / Наджибулло Бахромович Давлатов // Дис..... к.т.н., Душанбе-Казань-2020, 420 с. (в двух томах).

**Ходжармох Холмуродовна Ойматова¹, Шохин Рустамович Сафаров¹,
Мохира Абдусаломовна Зарипова², Махмадали Махмадиевич Сафаров²
Hojarmoh Kh. Oymatova¹, Shohin R. Safarov¹, Mohira A. Zaripova²,
Mahmadali M. Safarov²**

¹Бохтарский государственный университет им. Носира Хусрава г. Бохтар, Таджикистан; ²Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими, г. Душанбе, Таджикистан

¹Bokhtar State University named after Nosir Khusrav. Bokhtar, Tajikistan;
²Tajik Technical University named after acad. M.S. Osimi, Dushanbe, Tajikistan

Ойматова Хочармо Холмуродовна – к.п.н., доцент кафедры общей физики БГУ имени Носира Хусрава, г. Бохтар; **Сафаров Шохин Рустамович** - преподаватель кафедры общей физики БГУ имени Носира Хусрава, г. Бохтар; **Зарипова Мохира Абдусаломовна** – д.т.н. и.о. профессор ТТУ имени академика М.С.Осими. г. Душанбе; **Сафаров Махмадали Махмадиевич** – д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники ТТУ имени акад. М.С. Осими г. Душанбе.

Oymatova H. Kholmurodovna - Ph.D., Associate Professor of the Department of General Physics of BSU named after Nosira Khusrav, Bokhtar; **Safarov Shokhin Rustamovich** - lecturer of the Department of General Physics of BSU named after Nosira Khusrav, Bokhtar; **Zaripova Mokhira Abdusalomovna** - Doctor of Technical Sciences, Acting Professor of TTU named after Academician M.S. Osimi. Dushanbe; **Mahmadali Mahmadievich Safarov** - Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Worker of Science and Technology of TTU named after Academy of M.S. Osimi, Dushanbe.

Экспериментальное определение коэффициентов адсорбции и массопередачи тернарных систем до и после нагрева

Experimental determination of adsorption and mass transfer coefficients of ternary systems before and after heating

Ключевые слова: коэффициент адсорбции и массопередачи, тернарная система, кремниевая кислота, многослойная углеродная нанотрубка, нанопорошок гидразина, масса.

Аннотация: В работе представлены результаты опытного изучения массопередачи тернарных систем (КК, МСУНТ и нанопорошка гидразина) при нормальных условиях (атмосферное давление и комнатная температура). Для этого следовало располагать значениями разности масс рассматриваемых катализаторов и времени их выдержки во время увлажнения. В результате были построены графики зависимости коэффициента массопередачи тернарных систем в зависимости от времени. В

обоих графиков видно, что коэффициента массопередачи тернарных смесей с увеличением массы исследуемых смесей увеличивается, а с увеличением времени этот коэффициент уменьшается. Общая относительная погрешность при $\alpha=0,95$ составила 0,5%. На основе полученных результатов и закона соответственных состояний выведено эмпирическое уравнение для расчета массопередачи неисследованных опытным путем систем.

Keywords: coefficient of adsorption and mass transfer, ternary system, silicic acid, multilayer carbon nanotube, hydrazine nanopowder, mass.

Abstract: The paper presents the results of an experimental study of mass transfer of ternary systems (CC, MWCNT and hydrazine nanopowder) under normal conditions (atmospheric pressure and room temperature). For this, it was necessary to have the values of the difference between the masses of the considered catalysts and their holding time during moistening. As a result, graphs of the dependence of the mass transfer coefficient of ternary systems depending on time were built.

In both graphs it can be seen that the mass transfer coefficient of ternary mixtures increases with an increase in the mass of the studied mixtures, and with an increase in time, this coefficient decreases. The overall relative error at $\alpha = 0.95$ was 0.5%. On the basis of the results obtained and the law of the corresponding states, an empirical equation is derived for calculating the mass transfer of systems that have not been experimentally investigated.

В работе мы представили результаты опытного изучения адсорбции и массопередачи смесей тернарных систем (кремниевой кислоты, многослойной углеродной нанотрубки и нанопорошка гидразина) при нормальных условиях (атмосферное давление и комнатная температура). Для этого следовало располагать значениями разности масс рассматриваемых смесей и времени их выдержки во время увлажнения.

Определение коэффициента массопередачи и адсорбции тернарных систем, кремниевой кислоты (КК), многослойной углеродной нанотрубки (МСУНТ) и нанопорошка гидразина до нагрева (методом сканирующего колориметра) и после нагрева и сравнение результата расчета является целью данной работы.

Для определения коэффициента адсорбции и массопередачи тернарных систем была использована экспериментальная установка, которая приведена на рисунке 1 (изобретённая профессором Сафаровым М.М. и его учениками). Установка состоит из 2-х частей: 1) цилиндрический сосуд, сетка (а), 2)

секундомер и электронные весы (б), точность измерения которой равна 0,001 г. Диаметр сосуда около 5 см, высота 8 см диаметр сетки равен внутреннему диаметру сосуда, а площадь каждой сетки 1мм². В начале опыта определяем вес сосуда с помощью весов. В сосуд наливаем воду, также определяем его вес. Исследуемые образцы взвешивали вместе с сеткой. Затем сетку с исследуемыми гранулами погружали в сосуд с водой и засекали секундомером время увлажнения. Опыт повторяли через каждые 30 минут [1, 2].

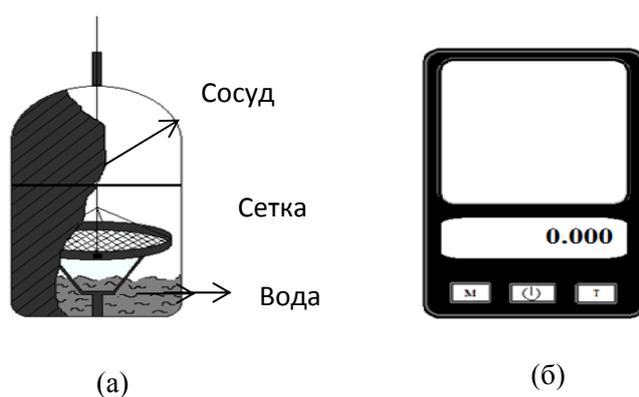


Рис. 1. Экспериментальная установка для определения коэффициента массопередачи; а) установка; б) электронные весы.

Экспериментальные данные приведены в таблице 1.

Таблица 1. Экспериментальные данные по изменению массы тернарных систем в двух образцах до нагревания.

Время t (час)	Масса <i>m</i> , (г) Образец №1				Образец №2			
	0,2	0,4	0,6	0,8	0,2	0,4	0,6	0,8
0,5	0,222	0,423	0,623	0,822	0,228	0,425	0,626	0,831
1,0	0,234	0,434	0,635	0,834	0,236	0,438	0,635	0,840
1,5	0,245	0,445	0,645	0,844	0,247	0,448	0,646	0,849
2,0	0,253	0,454	0,653	0,849	0,254	0,454	0,655	0,855
2,5	0,257	0,457	0,656	0,852	0,263	0,460	0,659	0,857
3,0	0,257	0,457	0,656	0,852	0,265	0,462	0,661	0,859
3,5	0,257	0,457	0,656	0,852	0,265	0,462	0,661	0,859
4,0					0,265	0,462	0,661	0,859

Образец №1-(76,92% H_2SiO_3 +19,31% N_2H_4 +3,85%МСУНТ).

Образец №2- (69,06% H_2SiO_3 +26,62% N_2H_4 +3,32%МСУНТ).

Таблица 2. Экспериментальные данные по изменению массы тернарных систем в двух образцах после нагревания.

Время t (час)	Масса <i>m</i> , (г) Образец №1				Образец №2			
	0,2	0,4	0,6	0,8	0,2	0,4	0,6	0,8
0,5	0,234	0,433	0,634	0,834	0,243	0,472	0,654	0,835
1,0	0,256	0,446	0,645	0,846	0,266	0,484	0,675	0,846
1,5	0,261	0,457	0,658	0,858	0,285	0,492	0,695	0,857
2,0	0,263	0,464	0,664	0,865	0,288	0,500	0,700	0,868
2,5	0,263	0,464	0,664	0,865	0,289	0,503	0,701	0,871
3,0	0,263	0,464	0,664	0,865	0,289	0,506	0,702	0,872
3,5	0,263	0,464	0,664	0,865	0,289	0,506	0,702	0,872

Образец №1-(76,92% H_2SiO_3 +19,31% N_2H_4 +3,85%МСУНТ).

Образец №2- (69,06% H_2SiO_3 +26,62% N_2H_4 +3,32%МСУНТ).

Из таблиц 1 и 2 видно, что масса тернарных систем при поглощении влаги увеличивается. Как видно из таблицы 1 и 2, поглощение влаги до нагревания тернарных систем меньше, чем поглощение влаги после нагревания этой системы. Кроме того, можно сказать, что до нагревания в первом и втором образце до 2 часов идёт процесс поглощения влаги воды, начиная с 2,5 часов, смеси тернарных систем станут насыщенными. После нагревания тернарных систем в первом и во втором образце поглощение влаги воды примерно увеличивается на 5,4%.

Для того чтобы определить коэффициент массопередачи в данной работе, нужно знать массу засыпки в сухом состоянии и в среде увлажнения. Для определения значения массы трёхкомпонентных материалов в разных средах, т.е. парах воды и порошка после каждого получаса уточняем массу образцов, применив электронные весы. С помощью следующего уравнения определяем коэффициент массопередачи [3]:

$$\beta = \frac{\Delta m}{m_1 S \cdot t}, \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} \right) \quad (1)$$

где, β - коэффициент массопередачи, $\left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} \right)$; Δm - разность масс опытного образца по результатам увлажнения, (кг); m_1 - масса сухого материала, г. S - общая площадь поверхности пара исследуемого материала, (м^2); t - время, за которое проводится увлажнение исследуемых материалов, час или секунда.

Используя выражения (1), определяем коэффициент массопередачи с учётом времени увлажнения.

Таблица 3. Коэффициента массопередачи при увлажнении смесей тернарных систем КК, МСУНТ и нанопорошка гидразина (при концентрации 76,92% H_2SiO_3 +19,31% N_2H_4 +3,85% МСУНТ и 69,06% H_2SiO_3 +26,62% N_2H_4 +3,32% МСУНТ) до нагревания.

Время t (час)	Коэффициент массопередачи β , $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$ Образец №1				Образец №2			
	0,2	0,4	0,6	0,8	0,2	0,4	0,6	0,8
0,5	31,14	16,28	10,85	7,78	39,63	17,69	12,27	10,97
1,0	16,99	7,78	5,66	4,25	11,32	9,20	4,25	3,18
1,5	15,57	7,78	4,72	3,54	15,57	7,08	5,19	3,18
2,0	11,32	6,37	3,77	1,77	9,91	4,25	4,25	2,12
2,5	5,66	2,12	1,42	1,06	9,91	4,25	1,89	0,71
3,0	5,66	2,12	1,42	1,06	5,66	1,42	0,94	0,71
3,5	5,66	2,12	1,42	1,06	5,66	1,42	0,94	0,71

Как видно из таблицы 3, коэффициент массопередачи изменяется каждые полчаса, т.е. со временем коэффициент массопередачи уменьшается.

На основе данных таблицы 3, построим график зависимости коэффициента массо-передачи β изучаемых образцов от времени увлажнения t.

Данные таблицы 3 (до нагрева) иллюстрируют то, что коэффициент массопередачи в первом образце при массе 0,2г смесей тернарных систем КК, МСУНТ и нанопорошка гидразина увлажненного парами воды на протяжении получаса уменьшается на 35%, а на протяжении 3,5 часов на 82%. Во втором образце при массе 1,2 г смесей тернарных систем на

протяжении получаса коэффициент массопередачи уменьшается на 71%, а на протяжении 3,5 часов на 86%.

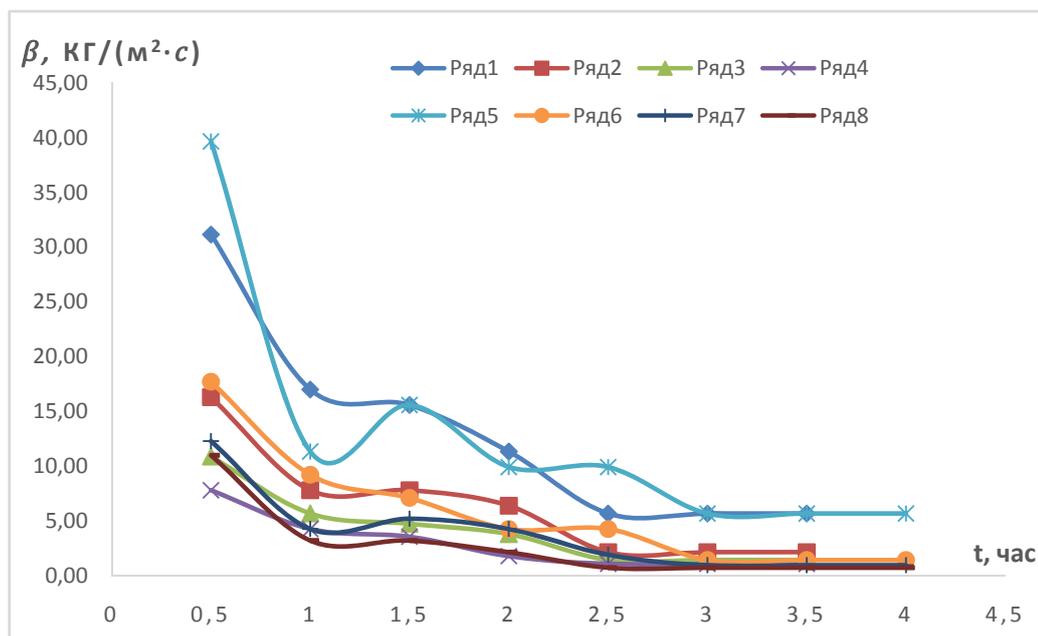


Рис. 2. Зависимости коэффициента массопередачи от времени до нагревания смесей тернарных систем. Ряд 1-(при массе 0,2г, первого образца); ряд 2-(при массе 0,4г, первого образца); ряд 3-(при массе 0,6г, первого образца); ряд 4-(при массе 0,8г, первого образца); ряд 5-(при массе 0,2г, второго образца); ряд 6-(при массе 0,4г, второго образца); ряд 7-(при массе 0,6г, второго образца); ряд 8-(при массе 0,8г, второго образца).

На рисунке 2 приведена зависимость коэффициентов массопередачи для тернарных систем от времени увлажнения. Как видно, из рисунка 2, с ростом времени коэффициент массопередачи тернарных систем в обоих опытах уменьшается. В первом опыте коэффициент массопередачи относительно меньше, чем во втором опыте. Это можно объяснить тем, что увеличением концентрации смесей тернарных систем приводит к увеличению коэффициента массопередачи тернарных систем.

Данные таблицы 4 (после нагрева) можно анализировать так: коэффициент массопередачи в первом образце при массе 0,2 г смеси

тернарных систем увлажненного парами воды на протяжении получаса уменьшается на 35%, а на протяжении 3,5 часов на 94 %. Во втором образце при этой массе на протяжении получаса коэффициент массопередачи при увлажнении уменьшается на 46%, а на протяжении 3,5 часов уменьшается на 98%.

Таблица 4. Коэффициент массопередачи при увлажнении смесей тернарных систем КК, МСУНТ и нанопорошка гидразина (при концентрации 76,92% H_2SiO_3 +19,31% N_2H_4 +3,85%МСУНТ и 69,06% H_2SiO_3 +26,62% N_2H_4 +3,32%МСУНТ) после нагревания.

Время t (час)	Коэффициент массопередачи β , $\frac{кг}{м^2 \cdot с}$ Образец №1				Образец №2			
	0,2	0,4	0,6	0,8	0,2	0,4	0,6	0,8
0,5	48,12	23,35	16,04	12,03	60,86	50,96	25,48	12,38
1,0	31,14	9,20	5,19	4,25	32,55	8,49	9,91	3,89
1,5	7,08	7,78	6,13	4,25	26,89	5,66	9,44	3,89
2,0	2,83	4,95	2,83	2,48	4,25	5,66	2,36	3,89
2,5	2,83	4,95	2,83	2,48	1,42	2,12	0,47	1,06
3,0	2,83	4,95	2,83	2,48	1,42	2,12	0,47	0,35
3,5	2,83	4,95	2,83	2,48	1,42	2,12	0,47	0,35

На основе данных таблицы 4, построим график зависимости коэффициента массо-передачи β изучаемых образцов от времени увлажнения t.

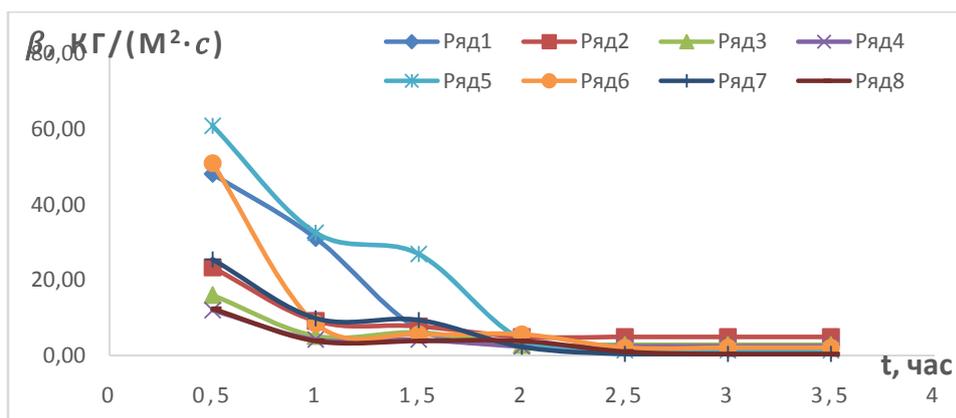


Рис. 3. Зависимости коэффициент массопередачи от времени после нагревания смесей тернарных системы. Ряд 1-(при массе 0,2г, до нагрева); ряд 2-(при массе 0,4г, до нагрева); ряд 3-(при массе 0,6г, до нагрева); ряд 4-(при массе 0,8г, до нагрева); ряд 5-(при массе 0,2г, после нагрева); ряд 6-(при массе 0,4г, после нагрева); ряд 7-(при массе 0,6г, после нагрева); ряд 8-(при массе 0,8г, после нагрева).

На рисунке 2, как и на рисунке 1, с ростом времени коэффициентмассопередачи тернарных систем в обоих опытах уменьшается. В первом опыте коэффициент массопе-редачи относительно меньше, чем во втором опыте. Такого рода изменения графика является следствием изменения концентрации МСУНТ (МСУНТ-является адсорбентом). Другими словами, чем меньше концентрация наполнителя в образце, тем больше массопередача.

Из таблице 1 и 2 можно объяснить то, что коэффициент массопередачи тернарных систем до нагревания на 12% меньше, чем после нагревания. Такого рода изменения графика является следствием изменения массы исследования смесей тернарных систем. Другими словами, чем меньше масса исследованных материалов в образце, тем больше коэффициент массопередачи. Общая относительная погрешность коэффициента массопередачи при $\alpha=0,95$ составила 0,5 %. На основе полученных результатов и закона соответственных состояний выведено эмпирическое уравнение для расчета массопередачи неисследованных опытным путем систем [4, 5].

Для обработки экспериментальных данных коэффициента массопередачи исследуемых образцов (кремниевых кислот, многослойной углеродных нанотрубок и нано-порошка гидразина) при разном времени выдержки в среде адсорбента, нами использован следующий закон термодинамического подобия.

$$\frac{\beta}{\beta_0} = f\left(\frac{t}{t_0}\right), \quad (2)$$

где, β и β_0 – коэффициент массоотдачи исследуемых образцов при различном времени выдержки $t_0 = 2$ ч. Выполнимость функциональной зависимости (2) показана на рисунках 4.

Рисунок 4 иллюстрируют достаточно хорошее совпадение с их общей кривой, в результате чего получим уравнение:

До нагревания для массы 0,2 г.

$$\beta = (1,0874 \left(\frac{t}{t_0}\right)^2 - 3,3598 \left(\frac{t}{t_0}\right) + 3,0007)\beta_0 \quad (3)$$

После нагревания для массы 0,2 г.

$$\beta = (2,9183 \left(\frac{t}{t_0}\right)^2 - 7,8514 \left(\frac{t}{t_0}\right) + 5,2037)\beta_0 \quad (4)$$

β_0 является функцией массы исследованных материалов, которые описываются выражением:

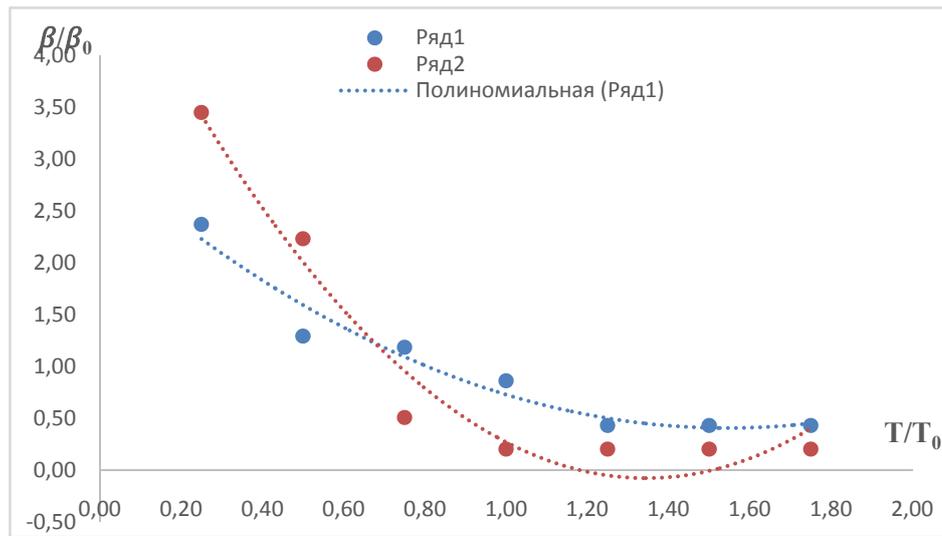


Рисунок 4. Относительная коэффициента массопередачи $\left(\frac{\beta}{\beta_0}\right)$ тернарных систем в зависи-мости от времени его увлажнения парами воды $\left(\frac{t}{t_0}\right)$. Ряд 1-(при массе 0,2г, до нагрева); ряд 1-(при массе 0,2г, после нагрева).

$$\beta_0 = f(m) \quad (5)$$

Линия, изображенная на рисунке 5, описывается уравнением:

До нагревания

$$\beta_0 = (3 \cdot 10^7 m^2 - 45355m + 20,971), \frac{\text{кг}}{(\text{м}^2 \cdot \text{с})} \quad (6)$$

После нагревания

$$\beta_0 = (3 \cdot 10^7 m^2 - 42058m + 21,299), \frac{\text{кг}}{(\text{м}^2 \cdot \text{с})} \quad (7)$$

Сопоставляя уравнения (6) и (7) с выражениями (2) и (3), можно получить следующие уравнения:

До нагревания для массы 0,2г.

$$\beta = (1,0874 \left(\frac{t}{t_0}\right)^2 - 3,3598 \left(\frac{t}{t_0}\right) + 3,0007) \cdot (3 \cdot 10^7 m^2 - 45355m + 20,971), \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} \quad (8)$$

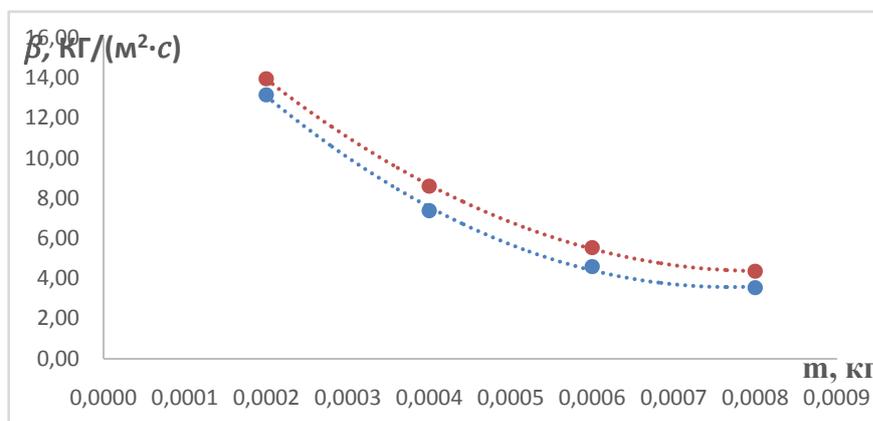


Рис. 5. Зависимость коэффициента массопередачи тернарных систем от массы.

После нагревания для массы 0,2г.

$$\beta = (2,9183 \left(\frac{t}{t_0}\right)^2 - 7,8514 \left(\frac{t}{t_0}\right) + 5,2037) \cdot (3 \cdot 10^7 m^2 - 42058m + 21,299), \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} \quad (9)$$

где β в $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$, $t_0 = 2$ ч, то есть время увлажнения тернарных систем. Общая относительная погрешность определения коэффициента массопередачи в уравнении (8), то есть до нагревания исследуемого образца составляет 1,03%, а в уравнении (9), то есть после нагревания равно 3% и была оценена по результатам измерений.

Для произведения расчёта коэффициента массопередачи тернарных систем необходимо знать только массу исследуемого образца.

Выводы. Представлены результаты опытных данных коэффициента массопередачи исследуемых тернарных систем (кремниевой кислоты, МСУНТ и нанопорошка гидразина) от времени и массы. На основе данных

коэффициента массопередачи впервые было получено эмпирическое уравнение для определения коэффициента массопередачи в интервале времени от 0,5 часов до 3,5 часов для исследуемых тернарных систем с доверительной погрешностью от 1,03 до 3%.

Список литературы:

1. **Сафаров М.М.** Адсорбционные свойства катализатора на основе гранулированной пористой окиси алюминия / М.М.Сафаров, А.Г. Мирзомамадов, С.С. Абдуназаров, М.А. Зарипова // Сборник тезисов докладов научной конференции «Актуальные проблемы современной науки» МИСиС. -Душанбе. - 2015. - С. 79-80.

2. **Сафаров М.М.,** Джураев Д.С., Холиков М.М., Тагоев С.А., Ризоев С.Г., Зарипова М.А., Мирзомамадов А.Г., Норов З.Ю., Абдуназаров С.С., Махмадиев Б.М., Тиллоева Т.Р. Способ и устройство для определения коэффициента адсорбции ферромагнитных наночастиц в зависимости от температуры при атмосферном давлении // Патент Республики Таджикистан № ТЖ 824, 2016.-7 с.

3. **Холиков М.М.** Платинный катализатор для нейтрализации выхлопных газов ДВС и расчет коэффициента адсорбции и массоотдачи / Холиков М.М., Сафаров М.М., Джураев Д.С. // Материалы Международной научной конференции на тему «Масъалаҳои муосири математика ва методикаи таълими он» бахшида ба 25-солагии Конституцияи Ҷумҳурии Тоҷикистон ва 80-солагии доктори илмҳои педагоги, профессор Шарифзода Ҷумъа Шариф (г. Бохтар, 18-19 октябри соли 2019). - С. 163-166.

4. **Зарипова М.А.** Применение критерии Нуссельта для обработки экспериментальных данных и определение коэффициента теплоотдачи / М.А. Зарипова, Т.Р. Тиллоева, Х.А. Зоилов и др. //Материалы республиканской

научно-практической конференции «Современные проблемы химии, химической технологии и металлургии»-Душанбе. – 2009. - С.39-41.

5. **Сафаров Ш.Р.** Получение эмпирических уравнений для расчета изменение энтальпии тернарных систем /Ш.Р. Сафаров, Х.Х. Ойматова, М.А. Зарипова, Дж.Ф. Собиров, М.Т. Тургунбаев // Материалым еждународной научно-практической конференции «Актуальные задачи математики и её преподавания», посвященная 20-летию изучения и развития естественных, точных дисциплин и математики в области науки и образования (2020-2040 гг.) и к 70-летию заслуженного работника Таджикистана профессора А.С. Сатторова. - Бохтар- 2020. - С. 59-61.

**Джамшед Абдусаломович Зарипов¹, Шухрат Тагойхонович
Зикилоев², Рустамджон Джаборович Давлатов²
Jamshed A. Zaripov¹, Shuhrat T. Zikillov², Rustamjon J. Davlatov²**

¹Таджикский технический университет имени акад. М.С. Осими,
Душанбе, Таджикистан; ²Медико-социального института Таджикистана,
Душанбе, Таджикистан

¹Tajik technical university by named akad. M.S.Osimi, Dushanbe, Tajikistan;
²Medical and Social Institute of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan

Зарипов Джамшед Абдусаломович - к.т.н., и.о. доцента кафедры “Теплотехника и теплоэнергетика” ТТУ им. акад. М.С. Осими, г. Душанбе; **Зикилоев Шухрат Тагойхонович** – ст. инсп. восп. отд. Медико-социального института Таджикистана, г. Душанбе; **Давлатов Рустамджон Джаборович** – доктор PhD, зав. кафедрой “Естественно-математических наук” Медико-социального института Таджикистана, г. Душанбе.

Zaripov Jamshed Abdusalomovich - Candidate of Technical Sciences, Acting Associate Professor of the Department of "Heat Engineering and Heat Power Engineering" TTU named after M.S. Osimi, Dushanbe; **Zikiloev Shukhrat Tagoykhonovich** - art. insp. vsp. otd. Medical and Social Institute of Tajikistan, Dushanbe; **Davlatov Rustamjon Dzhaborovich** - PhD, Head of the Department of "Natural and Mathematical Sciences" Medical and Social Institute of Tajikistan, Dushanbe.

Исследование коэффициента адсорбции и массопереноса известняка Яванского месторождения (Чаманзор) Республики Таджикистан

Research of the adsorption coefficient and mass transfer of limestone of the javan deposit (Chamanzor), Republic of Tajikistan

Ключевые слова: температура, коэффициент адсорбции, массопереноса, влага, время.

Аннотация: В статье представлены результаты экспериментальных исследований коэффициента адсорбции и массопереноса известняка при различных температурах. Для измерения коэффициента адсорбции и массопереноса при различных температурах исследуемых материалов использован метод взвешивания.

Key words: temperature, coefficient of adsorption, mass transfer, moisture, time.

Abstract: The article presents the results of experimental studies of the adsorption coefficient and mass transfer of limestone at different temperatures.

For measuring the coefficient of adsorption and mass transfer at various temperatures. The method of weighing was used for the materials under study.

Исследованы физико-химические и адсорбционные свойства равновесного состояния материалов в выбранном интервале температуры (304-329 К), поэтому необходимо уточнить влияние паров воды на изменение коэффициента адсорбции нанокompозитов известняка.

Адсорбция - избирательное поглощение газов, паров или растворенных в жидкости веществ твердым поглотителем, способным поглощать одно или несколько веществ из их смеси. Количество вещества, поглощенного сорбентом, зависит от концентрации поглощаемого вещества в парогazовой смеси или растворе, а также от температуры, при которой осуществляется процесс адсорбции [1]. В процессе адсорбции происходит выделение теплоты, что ведет к повышению температуры в системе и снижению активности адсорбентов. Количество поглощаемого вещества зависит от площади поверхности поглотителя, поэтому адсорбенты обладают чрезвычайно развитой поверхностью, что достигается за счет образования большого количества паров в твердом теле [1, 2].

Для определения коэффициента адсорбции сыпучих материалов используем следующее уравнение:

$$\Gamma = \frac{\Delta m \cdot 10^{-3}}{m_1 \cdot 10^{-3} \mu \cdot 10^{-3}} = \frac{(m_2 - m_1) \cdot 10^{-3}}{(m_1 \cdot \mu) \cdot 10^{-6}}, \left[\frac{\text{мол}}{\text{кг}} \right] \quad (1)$$

Где m_1 – масса исследуемого объекта в сухом виде (гр, кг); m_2 – масса исследуемого объекта во влажном виде (гр и кг); μ – молярная масса воды ($18 \cdot 10^{-3}$) [2, 3].

Результаты экспериментального исследования изменения массы образца (Згр. масса объекта) приведены в таблице 1.

Таблица 1. Исходные данные для численных подсчетов коэффициента адсорбции исследуемых образцов.

t, минут	31°C	36°C	41°C	46°C	51°C	56°C
1	3,002	3,075	3,169	3,182	3,192	3,197
2	3,005	3,094	3,171	3,183	3,193	3,197
3	3,007	3,105	3,173	3,185	3,195	3,197
4	3,009	3,122	3,175	3,187	3,196	3,197
5	3,021	3,134	3,177	3,188	3,197	3,197
6	3,042	3,157	3,178	3,188	3,197	3,197
7	3,054	3,166	3,179	3,189	3,197	3,197
8	3,06	3,167	3,18	3,189	3,197	3,197
9	3,06	3,167	3,18	3,19	3,197	3,197
10	3,07	3,168	3,181	3,191	3,197	3,197

Таблица 2. Зависимость коэффициента массопереноса известняка от температуры и времени увлажнения.

T, K	304K	309K	314K	319K	324K	329K	334K	339K
1	1,984	6,15	12,103	38,294	44,444	49,603	52,579	52,778
2	1,091	3,274	6,25	19,444	22,519	24,9	26,389	26,389
3	1,124	2,315	4,563	13,161	15,145	16,733	17,597	17,592
4	0,942	1,934	3,621	9,97	11,458	12,698	13,194	13,194
5	0,833	1,627	3,055	8,294	9,246	10,278	10,555	10,555
6	0,76	1,62	2,612	6,944	7,804	8,63	8,796	8,796
7	0,7	1,474	2,296	5,98	6,774	7,483	7,539	7,539
8	0,669	1,314	2,059	5,332	6,002	6,548	6,597	6,597
9	0,639	1,212	1,852	4,784	5,357	5,842	5,864	5,864
10	0,575	1,091	1,091	4,305	4,821	5,258	5,278	5,278

На основе значений таблицы 1 получен следующий график (рис. 1).
Уравнение коэффициента адсорбции, приведенное на рис. 2, от времени увлажнения имеет вид:

$$\Gamma_1 = -0,0048t^2 + 0,024t + 0,9815 \quad (2)$$

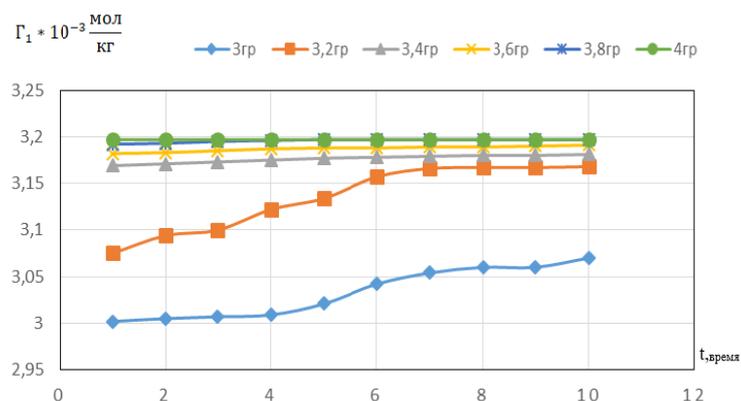


Рис. 1. График зависимости коэффициента адсорбции от времени увлажнения для определенных масс объекта.

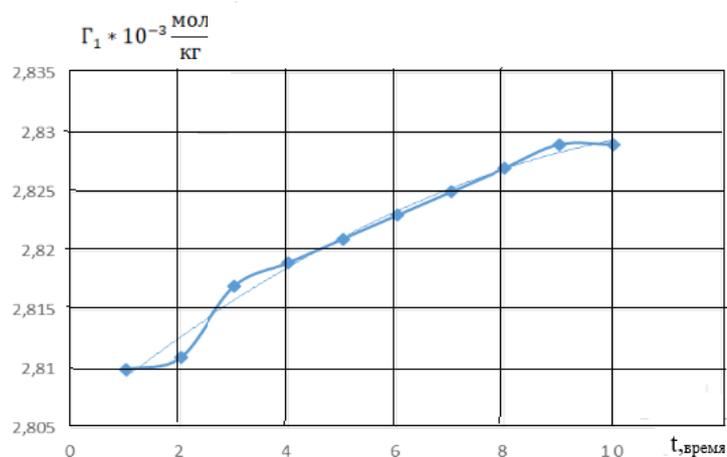


Рис. 2. График зависимости коэффициента адсорбции известняка от времени увлажнения.

Для обработки и обобщения экспериментальных данных коэффициента адсорбции использован закон термодинамического подобия в виде:

$$\Gamma/\Gamma_1 = f(t/t_1) \quad (3)$$

Кривая линии на рисунках 2 описывается выражением:

$$\Gamma/\Gamma_1 = -0,0048(t/t_1)^2 + 0,024(t/t_1) + 0,9815 \quad (4)$$

Таблица 3. Зависимость Γ_1 от температуры опыта.

T, K	304	309	314	319	324	329
$\Gamma_1 * 10^{-3}$	3,021	3,134	3,177	3,188	3,197	3,197

МОЛ/КГ						
%	1,3%	-1,6%	-1,8 %	-2,5%	-2,3%	-1,9%
\sum %	-1,5					

Функциональная зависимость $\Gamma_1=f(T)$ при температуре 31°C, (304 К) и среднее значение 5 минут. Полученные данные приведены в таблице 3.

Для уточнения погрешности каждого объекта необходимо провести кривые уравнения. Уравнение зависимости относительной массы от температуры имеет вид:

$$\Gamma_1 = -0,0005T^2 + 0,3231T - 48,922 \quad (5)$$

Уравнение зависимости относительной массы от температуры имеет вид:

$$\Gamma = [-0,0048(t/t_1)^2 + 0,024(t/t_1) + 0,9815] * \Gamma_1 \quad (6)$$

Из выражения (6) с учетом (5) получим:

$$\Gamma = [-0,0048(t/t_1)^2 + 0,024(t/t_1) + 0,9815] * (-0,0005T^2 + 0,3231T - 48,922) \quad (7)$$

В результате погрешности уравнение (6) 0,3% и уравнение (7) до 1,5%.

Изучение теплофизических свойств теплоносителей способствует развитию и совершенствованию современных представлений о параметрах порошковых свойств извести, выяснению механизма межмолекулярного взаимодействия в конкретных веществах, выбранных в качестве теплоносителей или массопереноса. Характер изменения теплопереноса исследуемого известняка представлен на рис. 2.

Из анализа результатов, представленных на рисунке 2, следует, что с ростом времени температура увеличивается. Согласно этим же данным можно заключить, что теплоперенос также зависит от структуры образцов [2, 3].

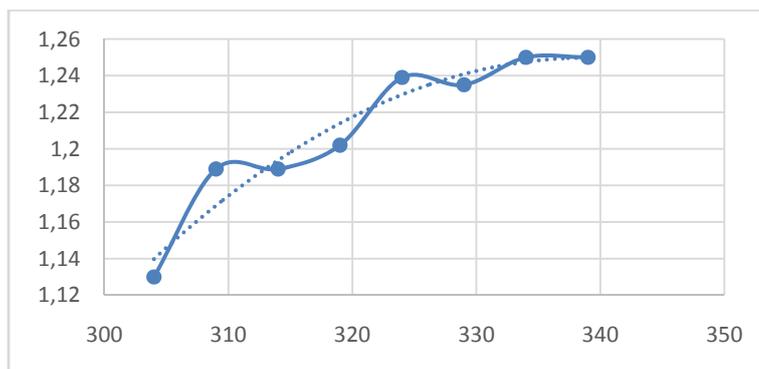


Рис. 3. Зависимость коэффициента массопереноса известняка от времени при различных температурах.

Как видно из анализа результатов, представленных на рисунке 3, с увеличением относительной температуры до 334 К относительное время сначала увеличивается, а потом после 5 минут идет постоянно 339 К.

Приведенная кривая линия на рисунке 3, описывается следующим выражением:

$$\beta_1 = -9 \cdot 10^{-5} T^2 + 0,061 T - 9,0907 \quad (8)$$

Результаты экспериментальных исследований показали, что температура исследуемого известняка до определенного времени увеличивается, а потом становится практически постоянной (рисунок 3).

Как видно из анализа рисунка 3, экспериментальные данные в пределах выбранного доверительного интервала могут быть описаны следующим соотношением

$$\frac{\beta}{\beta_1} = -0,0267 \left(\frac{\tau}{\tau_1} \right)^2 + 0,3516 (\tau) - 0,0095 \quad (9)$$

Кривая, приведенная на рисунке 3, описывается следующим соотношением:

$$\beta = \left(-0,0267 \left(\frac{\tau}{\tau_1} \right)^2 + 0,3516 (\tau) - 0,0095 \right) \cdot \beta_1 \quad (10)$$

Из уравнения (10) с учетом (9) для $T = 319$ К получим:

$$\beta = \left(-0,0267 \left(\frac{\tau}{\tau_1} \right)^2 + 0,3516 \left(\frac{\tau}{\tau_1} \right) - 0,0095 \right) * (-9 * 10^{-5} T^2 + 0,061 T - 9,0907) \quad (11)$$

Расчеты показали, что максимальная общая относительная погрешность при доверительной вероятности $\alpha=0,95$ равна для уравнения (10)-0,4 %, а для уравнения (11) – 0,2 %.

Выводы

1. Изучение кинетических свойств теплоносителей способствует развитию и совершенствованию современных представлений о параметрах порошков извястника, выяснению механизма межмолекулярного взаимодействия в конкретных веществах, выбранных в качестве теплоносителей или массопереноса.

2. Получены экспериментальные данные по кинетическим свойствам коэффициента адсорбции и массопереноса в зависимости от массы при различных температурах в пределах изменения температуры (20-80 °С).

3. На основе экспериментальных данных по кинетическим свойствам материалов определены предельные времена использования данных составов в виде рабочих тел в теплообменниках до существенной потери их кинетических свойств.

4. Установлено, что температурные адсорбенты обладают чрезвычайно развитой поверхностью, что достигается за счет образования большого количества паров в твердом теле.

Список литературы

1. **Влияние** наноструктурных частиц на изменение термодинамических и адсорбционных свойств на линии увлажнения / М.М. Сафаров, М.А. Зарипова, А.С. Назруллоев и др. // Тезисы докладов 10^{-го} Всероссийского симпозиума с международным участием. ФТИ имени А.Ф.Иоффе, РАН-Санкт-Петербург, 2015. - С.42.

2. **Назримадов Д.А.**, Сафаров М.М., Мирзомамадов А.Г., Абдуназаров С.С. Связи между теплопроводностью и коэффициентом адсорбции кобальтовых катализаторов на основе пористого оксида алюминия в гранулированной форме в среде электролитов. Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. 2019. № 4. -С. 120-127.

3. **Мирзомамадов А.Г.**, Сафаров М.М., Холиков М.М., Джураев Д.С., Абдуназаров С.С., Назримадов Д.А., Назруллоев А.С. Теплофизические и адсорбционные свойства медных катализаторов на основе пористого гранулированного оксида алюминия в среде воздух-пар воды. В сборнике: Сушка, хранение и переработка продукции растениеводства. Сборник научных трудов Международного научно-технического семинара, посвящённого 175-летию со дня рождения К.А. Тимирязева. 2018. - С. 250-255.

Балашов А.А.
Balashov A.A.

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»,
г. Тамбов

Tambov State Technical University, Tambov

Балашов Алексей Александрович – к.т.н., доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий и теплотехника».

Balashov Alexey Alexandrovich – candidate of technical sciences, associate professor of the department «Power supply and heat engineering».

Исследование метода обработки полезного сигнала при тепловом контроле структурных переходов в полимерах

Investigation of a useful signal processing method for thermal control of structural transitions in polymers

Ключевые слова: метод разладки, полезный сигнал, полимер, структурный переход, тепловая активность.

Аннотация: Разработан метод обнаружения изменения среднего в последовательности информативного параметра, с использованием выделения рабочего участка термограммы позволяющий определять структурный переход в полимере.

Key words: decomposition method, useful signal, polymer, structural transition, thermal activity.

Abstract: A method for detecting changes in the average in the sequence of an informative parameter has been developed, using the selection of the working section of the thermogram, which allowing to determine the structural transition in the polymer.

В последнее время разработано множество информационно-измерительных систем (ИИС), реализующих контактные методы неразрушающего контроля структурных переходов в полимерных материалах по изменениям их теплофизических свойств (ТФС) с ростом температуры. ТФС определяют по рабочим участкам термограмм, полученных при тепловом воздействии от круглого источника тепла постоянной мощности по моделям плоского и сферического полупространств. Однако при работе ИИС возникает шум с достаточно

большой амплитудой из-за теплового движения заряженных частиц в элементах электрических цепей. В связи с этим, разработка программного обеспечения для ИИС, реализующая метод обработки полезного сигнала при тепловом контроле структурных переходов в полимерах является актуальной и востребованной.

Теоретические основы метода теплового контроля структурных переходов в полимерах представлены в [1]. Теоретические основы метода обнаружения изменения среднего в последовательности гауссовских случайных величин представлены в [2].

Пример реализации случайного процесса с разладкой среднего, показан на рис. 1, а. Где разладкой является скачкообразное изменение его свойств, происходящее в неизвестный момент времени. Соответствующая этой реализации кумулятивная сумма представлена в виде функции (1) и на рис. 1, б. А статистика с порогом представлена функцией (3) и на рис. 1, в.

Логарифм отношения правдоподобия различения гипотез H_0 и H_1 при гауссовом распределении дискретных составляющих функции $f(x)$ для координаты скачка x_k , задаваемой ее номером k , при выполнении условия независимости составляющих принимает вид [2]

$$\Lambda(k) = \frac{v_f}{\sigma_f^2} \sum_{m=k}^M \left(f_m - \mu_{f_0} - \frac{v_f}{2} \right), \quad (1)$$

где $v_f = m_{f_0} - m_{f_1}$ – величина скачка функции, представленной составляющими f_1, \dots, f_M , в анализируемой точке, m_{f_0} – среднее до скачка, m_{f_1} – среднее после скачка; σ_f^2 – дисперсия значений f_1, \dots, f_M анализируемого ряда.

$$\tilde{k} = \arg \max v_f \sum_{m=k}^M \left(f_m - \mu_{f_0} - \frac{v_f}{2} \right), \quad (2)$$

$$g_k = \Lambda(\tilde{k}) = \max_k v_f \sum_{m=k}^M \begin{matrix} H_1 \\ \left(f_m - \mu_{f0} - \frac{v_f}{2} \right) > \delta, \\ H_0 \end{matrix} \quad (3)$$

где δ – порог, выбираемый исходя из выбранного критерия; $k \in [1, \dots, M]$.

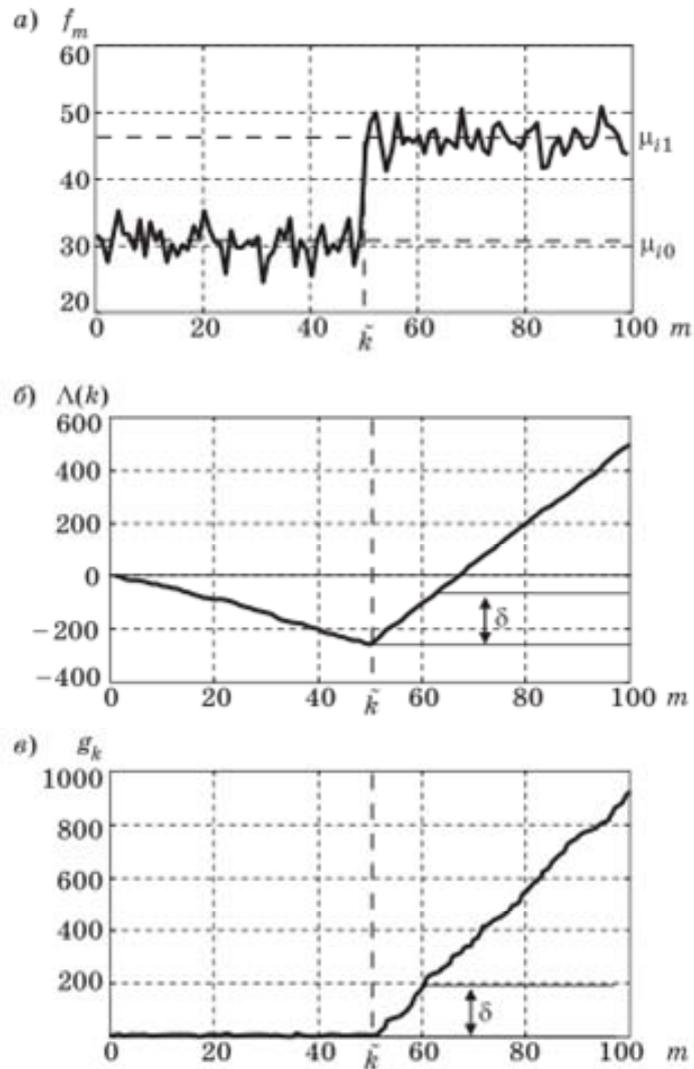


Рис. 1. Пример реализации случайного процесса с разладкой среднего (а), соответствующая этой реализации кумулятивная сумма (б) и статистика g_k (в).

Исходные экспериментальные данные для ИИС имеют вид, представленные на рис. 2, а на котором выделен второй рабочий участок термограммы. Реализации функций для материала политетрафторэтилен (ПТФЭ) имеет следующий вид, представленные на рис. 2, б, в.

Результаты применения алгоритма [3] показывает, что есть разладка на исходных экспериментальных данных. Таким образом, разработанное алгоритмическое и программное обеспечение метода обнаружения изменения среднего в последовательности информативного параметра, с использованием выделения рабочего участка термограммы позволяет определять структурный переход в полимере.

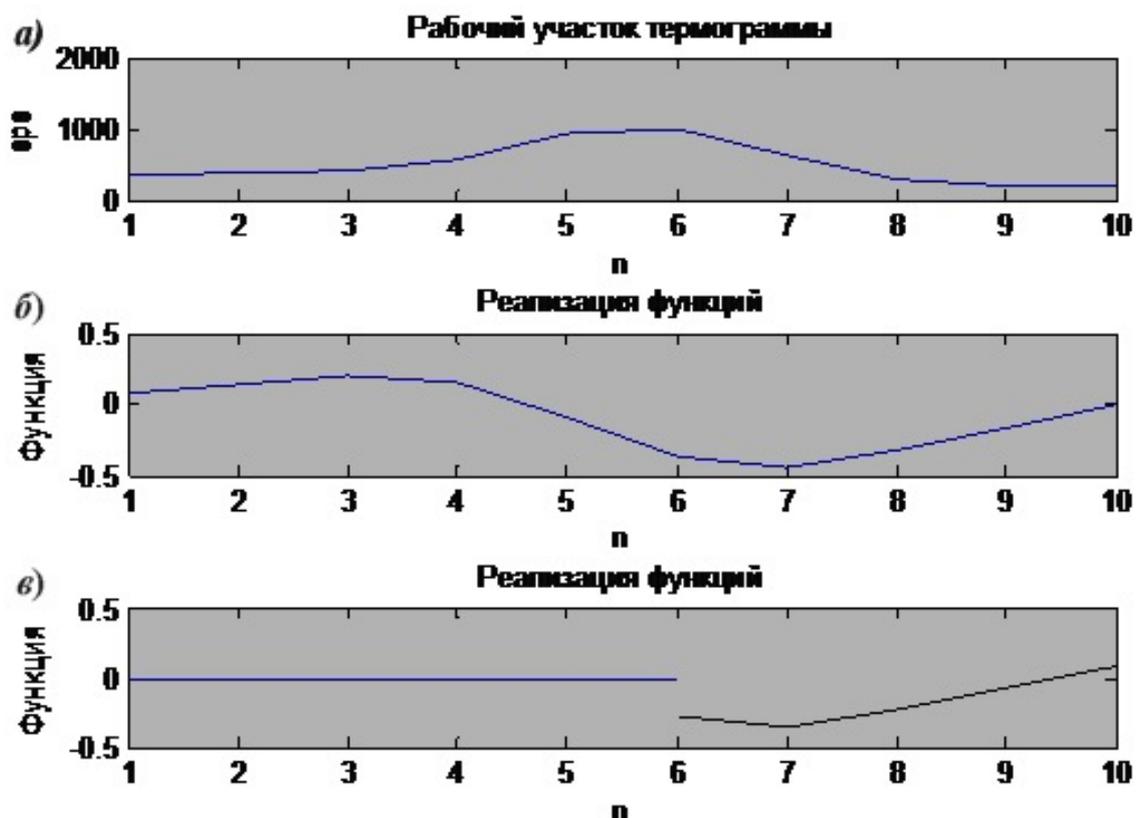


Рис. 2. Реализация функций для материала ПТФЭ.

Список литературы

1. **Многомодельные** методы в микропроцессорных системах неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов / С.В. Мищенко, Ю.Л. Муромцев, Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова, И.В. Рогов, О.Н. Попов. – Тамбов. – 2012. – С. 112.
2. **Козин И.А.** Модифицированный алгоритм обнаружения разладки случайного процесса и его применение при обработке многоспектральных

данных / И.А. Козин, Г.Н. Мальцев // Информационно-управляющие системы. – 2012. № 3(58). – С. 9–17.

3. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020613762 Российская Федерация. Метод выделения полезного сигнала при регистрации структурных переходов в полимерах с помощью статистических критериев: № 2020612668: заявл. 10.03.2020: опубл. 23.03.2020 / А. А. Балашов; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет».

Громов Ю.Ю.¹, Зенкин А.А.², Родионов В.В.², Григорян А.С.²
Gromov Yu.Yu.¹, Zenkin A.A.², Rodionov V.V.², Grigoryan A.S.²

¹Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов;

²Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», г. Воронеж

¹Tambov State Technical University, Tambov; ²Military Educational and Scientific Center of the Air Force N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy, Voronezh

Громов Юрий Юрьевич – доктор технических наук, профессор по кафедре информационных процессов и управления; **Зенкин Александр Александрович** – адъюнкт кафедры робототехнических комплексов и систем воздушного базирования; **Родионов Вадим Владимирович** – адъюнкт кафедры робототехнических комплексов и систем воздушного базирования; **Григорян Альберт Сергеевич** – курсант факультета беспилотной авиации;

Gromov Yuri Yurievich – doctor of technical sciences, professor at the Department of Information Processes and Management; **Zenkin Alexander Alexandrovich** – post graduate student of the departments of robotic complexes and air-based systems; **Rodionov Vadim Vladimirovich** – post graduate student of the departments of robotic complexes and air-based systems; **Grigoryan Albert Sergeevich** – cadet of the Faculty of Unmanned Aviation.

**Экспериментальная апробация дистанционной оценки
теплофизических параметров материалов в видимом и инфракрасном
диапазонах длин волн с применением нейронных сетей**

**Experimental approbation of remote estimation of thermophysical
parameters of materials in the visible and infrared wavelength ranges using
neural networks**

Ключевые слова: нейронная сеть; теплофизические параметры; температура; алгоритм; оптико-электронная система; беспилотный летательный аппарат.

Аннотация: в статье рассмотрена возможность применения нейронных сетей для обработки изображений в инфракрасном диапазоне длин волн, полученных с помощью многоспектральной оптико-электронной системы беспилотного летательного аппарата, а также представлены результаты классификации по данным дистанционной оценки теплофизических параметров (ДО ТФП) материалов на основе предложенного нейросетевого алгоритма.

Keywords: neural network; thermophysical parameters; temperature; algorithm; optoelectronic system; unmanned aerial vehicle.

Abstract: the article considers the possibility of using neural networks for processing images in the infrared range of wavelengths obtained using a multispectral optoelectronic system of an unmanned aerial vehicle, and also presents the results of classification according to remote assessment of thermophysical parameters of materials based on the proposed neural network algorithm.

Современные оптико-электронные системы (ОЭС) размещаемые на беспилотных летательных аппаратах (БПЛА) повысили эффективность ДО свойств объектов мониторинга, позволили непрерывно вести ДО ТФП в разное время суток и в различных условиях. Однако, в процессе эксплуатации данных систем появилась проблема оперативной и качественной обработки постоянно увеличивающегося потока информации.

Для решения проблемы корректной обработки объемного потока сведений следует автоматизировать ряд операций, таких как: поиск и выделение объекта ДО, сравнение имеющихся по нему данным с последующей оценкой точности, корреляция нескольких изображений одного и того же объекта, определение границ объекта, выделение его из фона и фильтрацию шумов, а также распознавание объекта ДО до вида, класса, типа [1].

Для решения задачи поиска и классификации объектов применяются методы машинного обучения, однако необходимо ввести в алгоритм работы нейронной сети (НС) идентификационный признак, позволяющий классифицировать обнаруженные объекты по теплофизическим параметрам (ТФП) материалов. Необходимо добиться устойчивой классификации объектов разведки НС по их ТФП в градациях в ИК-диапазоне длин волн.

Нейросетевой подход к решению нестационарных теплофизических задач заключается в следующем [2]. Требуется в области Ω найти решение уравнения:

$$\frac{du}{dt} = A(u) + f(x), x \in \Omega \subset R^{\phi}, \quad (1)$$

удовлетворяющее условию на границе Γ :

$$B(U) = G(X), X \in \Gamma \quad (2)$$

Целью обучения НС является поиск оптимального набора весовых коэффициентов (экстремума функции) для минимизации ошибки сети.

В качестве алгоритма обучения определен метод обратного распространения ошибки на основе масштабируемого метода сопряженных градиентов.

Исходными данными для обучения НС приняты одновременные изображения в видимом и ИК – диапазоне длин волн с заранее известным расположением эталонных материалов, полученные с ОЭС БПЛА в ходе натурального суточного эксперимента (рис.1).

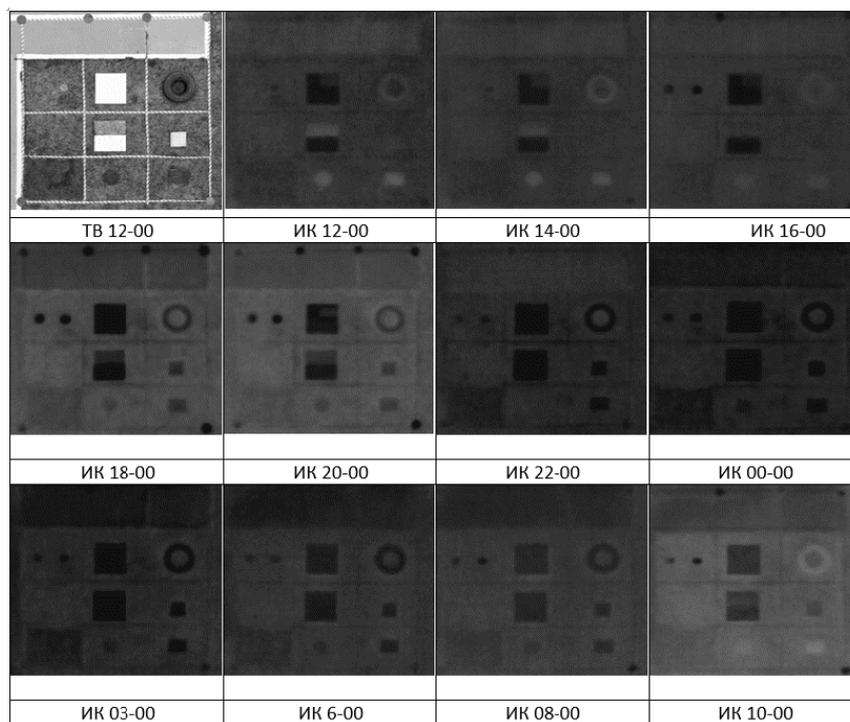


Рис. 1. Фотоснимки эталонных материалов в ИК и видимом диапазонах длин волн.

Полученное множество входных параметров обучающей выборки представляет собой матрицу размерностью 11 x 110, строки которой соответствуют типу эталонного материала в каждом слое кубоида одновременных псевдоцветных ИК – изображений, а столбцы – градации

яркости, которым соответствуют значения радиационных температур в выделенных областях изображений. Значения градации яркости приведены к логарифмическому масштабу для удобства выполнения численных расчетов. Графически обучающая выборка НС представлена на рисунке 2.

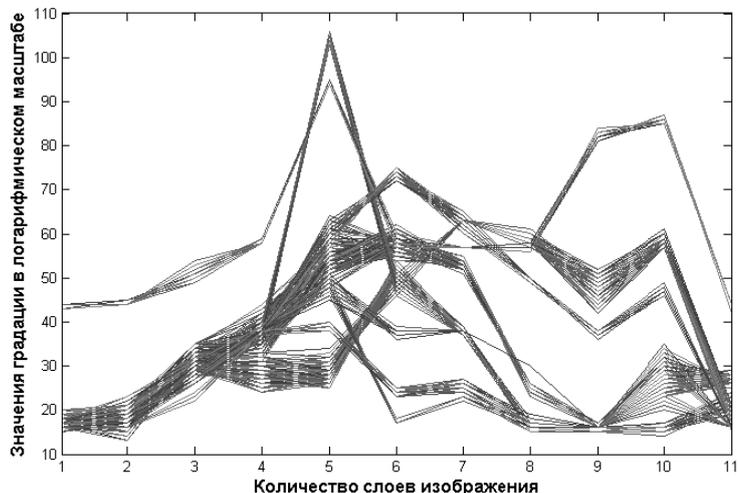


Рис. 2. График входных параметров обучающей выборки НС.

Алгоритм НС реализован в программной среде MATLABR2014a с применением библиотеки формирования нейронных сетей Neural Network Toolbox.

На рисунке 3 графически представлен процесс обучения НС, время обучения составило 60 эпох.

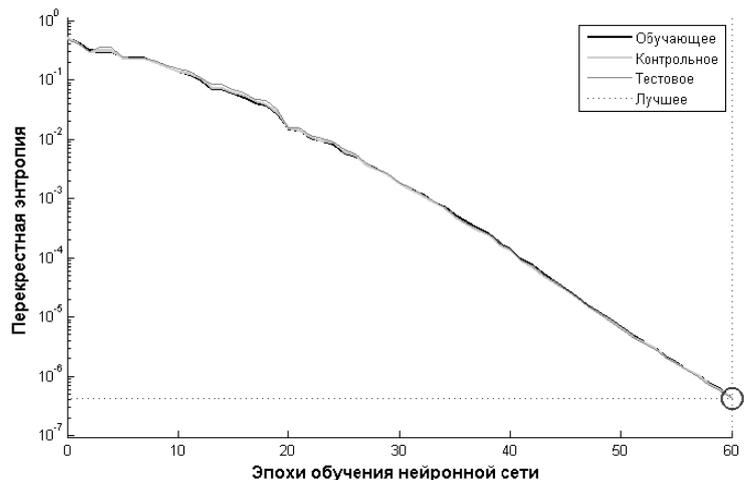


Рис. 3. График обучения нейронной сети.

Сформирована матрица несоответствий классификатора, который был создан в результате обучения НС (рис. 4). Стоит отметить, что на суммарной матрице доля ошибочной классификации объектов сведена к нулю.

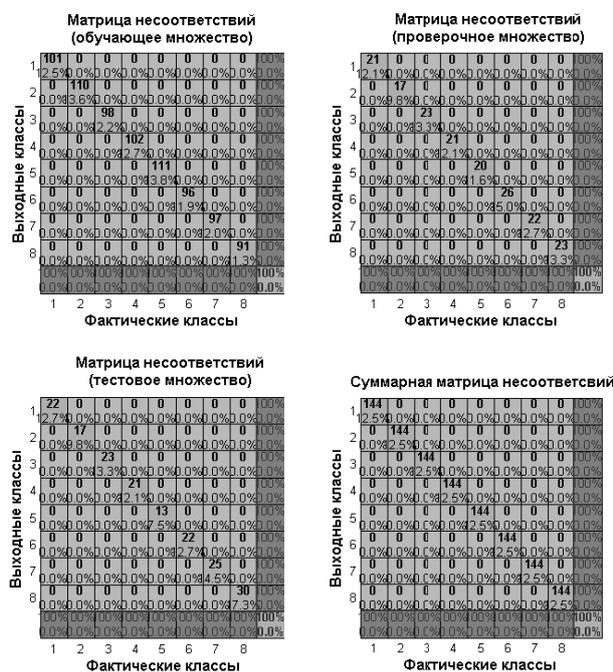


Рис. 4. Матрицы несоответствий классификатора НС.

Для тестирования работы НС выбран кубоид 11 псевдоцветных ИК – изображений с заранее известным расположением эталонных материалов, полученных в результате суточного натурного эксперимента. Результат работы полученного нейросетевого алгоритма (рисунок 5), подтвердил возможность классификации объектов по ТФП материалов.

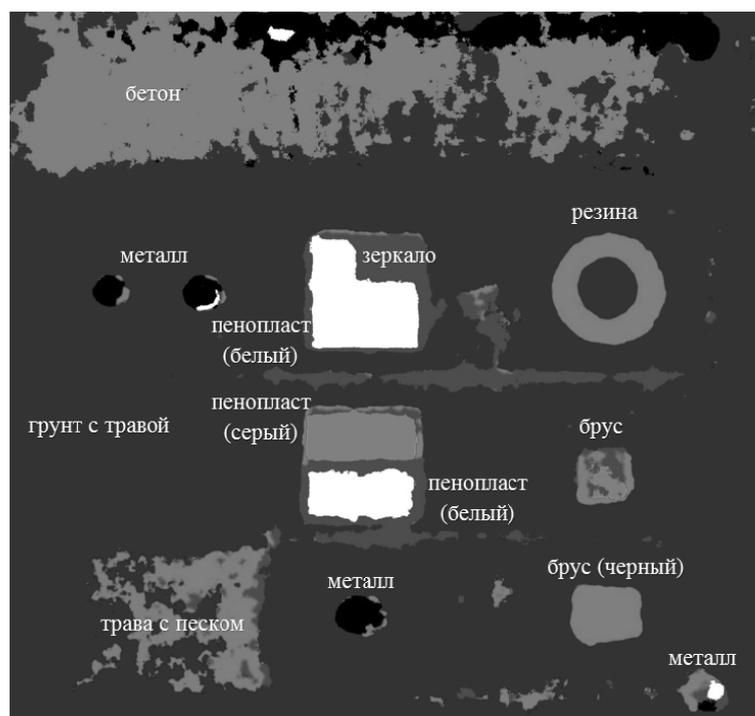


Рис. 5. Результат обработки нейронной сетью тестового изображения.

На классифицированном изображении выявлены следующие объекты: брус (окрашенный в черный цвет), металлический диск, трава с песком, брус, пенопласт (белый), пенопласт (окрашенный в темно-серый цвет), грунт с травой, автомобильная резина, зеркало, бетон.

Таким образом, полученные результаты доказывают возможность практического применения нейронных сетей для автоматизированной обработки разновременных ИК – изображений получаемых с ОЭС БпЛА при ведении ДО ТФП с последующей классификацией объектов.

Список литературы

1. **Студитский А.С.** Исследование и разработка многофункционального оптико-электронного средства наблюдения и разведки / Студитский А.С. – М.: НИИ и МНПО «Спектр», 2013. – 112 с.

2. **Ищук И.Н.,** Громов Ю.Ю., Постнов К.В., Степанов Е.А., Тяпкин В.Н. Корреляционная обработка кубоида инфракрасных изображений, получаемых с беспилотных летательных аппаратов. Часть 1. Моделирование и обработка инфракрасных сигнатур техногенных объектов в процессе

суточного изменения температур // Техника и технологии, 2016. – № 9(3). – С. 310–318.

3. **Веселов Ю. Г.**; Островский, А. С.; Сельвесюк, Н. И. В сборнике: Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «Техническое зрение и распознавание образов». Сборник научно-технической конференции, 2019. – С. 173 – 175.

4. **Ищук И.Н.**, Долгов А.А., Филимонов А.М., Дмитриев Д.Д. Методика оценки динамики изменения вероятностных характеристик распознавания объектов воздушной разведки // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии, 2019. – Т. 12. – №6. – С. 683 – 693.

Ищук И.Н., Зенкин А.А., Родионов В.В., Садчиков В.С.
Ischuk I.N., Zenkin A.A., Rodionov V.V., Sadchikov V.S.

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»,
г. Воронеж
Military Educational and Scientific Center of the Air Force N. E. Zhukovsky
and Y. A. Gagarin Air Force Academy, Voronezh

Ищук Игорь Николаевич – доктор технических наук, профессор, начальник кафедры робототехнических комплексов и систем воздушного базирования; **Зенкин Александр Александрович** – адъюнкт кафедры робототехнических комплексов и систем воздушного базирования; **Родионов Вадим Владимирович** – адъюнкт кафедры робототехнических комплексов и систем воздушного базирования; **Садчиков Вадим Сергеевич** – курсант факультета беспилотной авиации.

Ischyk Igor Nikolaevich – doctor of technical sciences, professor, head of the Department of Robotic Complexes and Air-based Systems; **Zenkin Alexander Alexandrovich** – post graduate student of the departments of robotic complexes and air-based systems; **Rodionov Vadim Vladimirovich** – post graduate student of the departments of robotic complexes and air-based systems; **Sadchikov Vadim Sergeevich** – cadet of the Faculty of Unmanned Aviation.

Анализ изменения радиационных и термодинамических температур материалов в течение суток для выбора рационального интервала дистанционной оценки теплофизических параметров

Analysis of changes in radiation and thermodynamic temperatures of materials during the day to select a rational interval for remote assessment of thermophysical parameters

Ключевые слова: теплофизические параметры; анализ; температура; оптико-электронная система; беспилотный летательный аппарат.

Аннотация: в статье представлен анализ изменения радиационных и термодинамических температур материалов и фонов в течение суток, для их дальнейшего сопоставления и определения рациональных характеристик наблюдаемого процесса с применением оптико-электронных систем беспилотных летательных аппаратов.

Keywords: thermophysical parameters; analysis; temperature; optoelectronic system; unmanned aerial vehicle.

Abstract: the article presents an analysis of changes in radiation and thermodynamic temperatures of materials and backgrounds during the day, for

their further comparison and determination of rational characteristics of the observed process using optoelectronic systems of unmanned aerial vehicles.

В настоящее время остается актуальным вопрос оценки эффективности применения оптико-электронных средств для выполнения задач дистанционной оценки теплофизических параметров (ДО ТФП). Действенным признаком при ДО ТФП на фоне земной поверхности, может выступать значение теплового контраста объекта ДО относительно фона [1]. При ведении ДО ТФП в ИК диапазоне наибольший интерес представляет вопрос оценки рационального интервала времени для ее проведения.

Экспериментальная часть

На основе натурального суточного эксперимента 06.11.2020 с 12:00 до 10:00 07.11.2020 следующего дня, проведен анализ изменения радиационных и термодинамических температур эталонных материалов. Результаты измерений термодинамических и радиационных температур материалов получены тепловизионным приемником беспилотного летательного аппарата (БпЛА) и измерительными приборами с учетом метеорологических условий [2, 3].

В качестве эталонов были выбраны: деревянный брус, окрашенный в черный цвет (1); металлический диск, окрашенный в черный цвет (2); песок с травой (3); брус (4); пенопласт (белого цвета, темно-серого цвета) (5); грунт с травой (6); автомобильная резина (7); пенопласт (белого цвета) (8); зеркало (9); два металлических диска (10); бетон (11). Участок местности эксперимента, с материалами принятыми за эталоны представлен на рисунке 1.

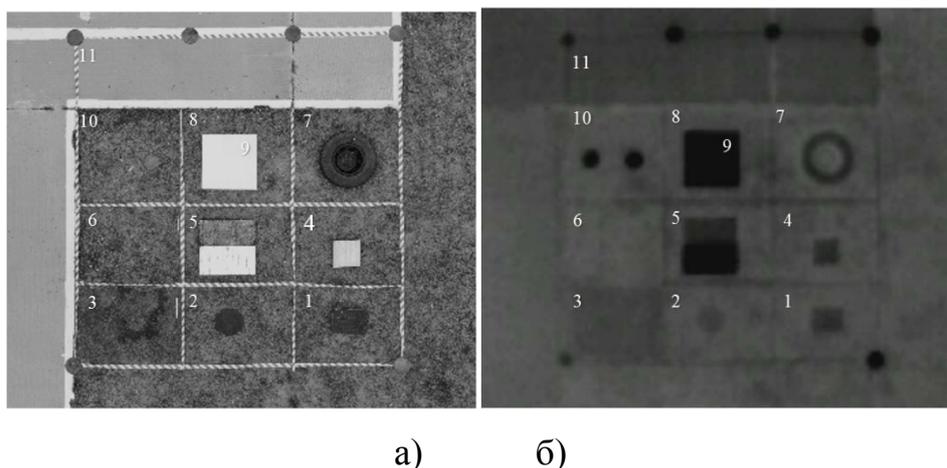


Рис. 1. Изображения участка местности с материалами, принятыми за эталоны: а) – видимый диапазон длин волн; б) – ИК диапазон длин волн.

График динамики изменения радиационных температур на поверхности эталонных материалов, представлен на рисунке 2.

Для детального анализа изменений термодинамических и радиационных температур, использовались следующие материалы: деревянный брус, окрашенный в черный цвет; автомобильная резина.

Данные изменения радиационной T_r и термодинамической T температуры для материала – деревянный брус, окрашенный в черный цвет и автомобильной резины с коэффициентом излучательной способности ϵ , при температуре воздуха T_A , скорости ветра V_v , в течение суток, представлены на рисунках 3, 4.

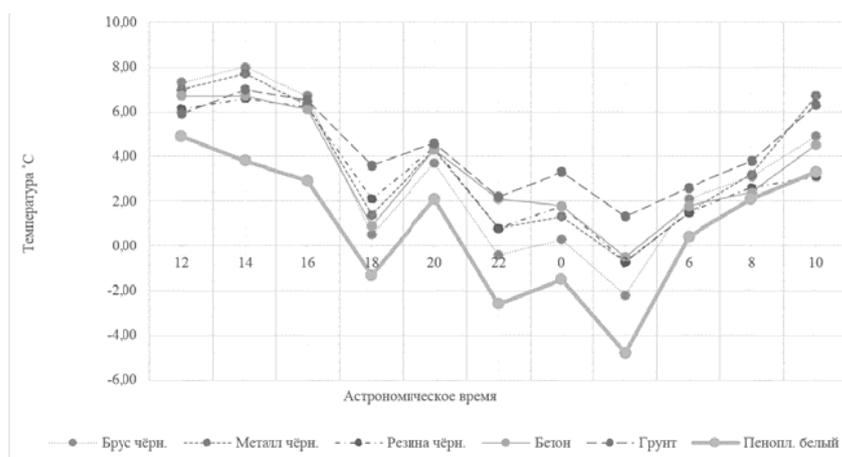


Рис. 2. График суточного изменения радиационной температуры наблюдаемых материалов (06.11.2020-07.11.2020).

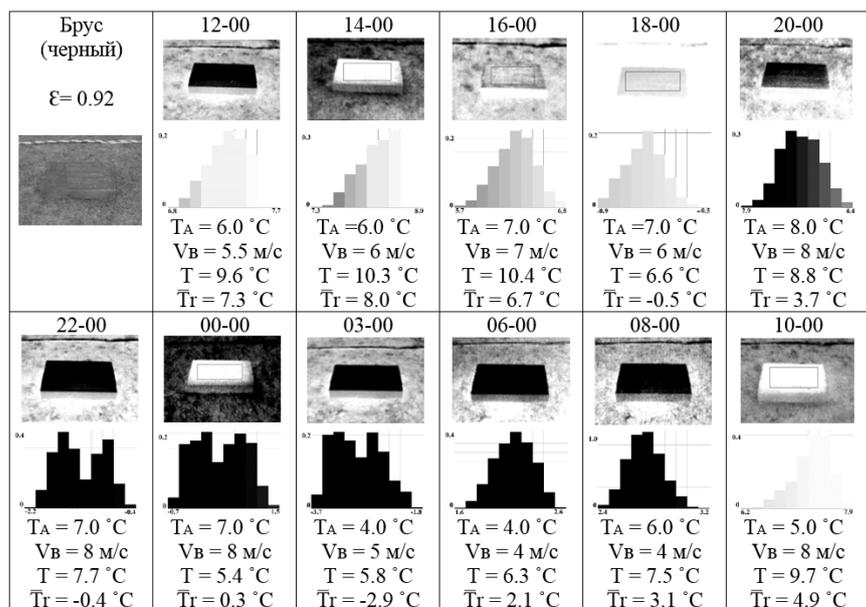


Рис. 3. Изменение радиационной и термодинамической температуры для материала – деревянный брус, окрашенный в черный цвет.

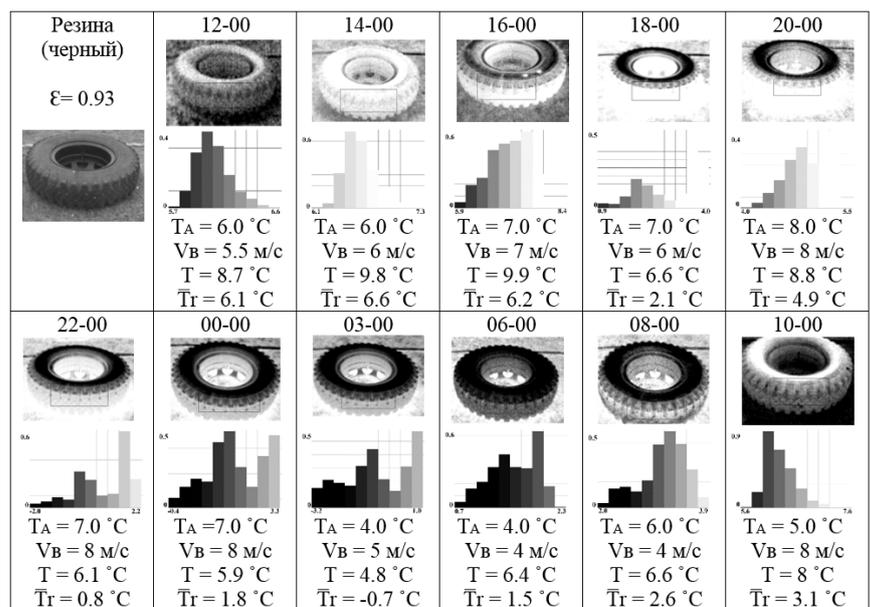
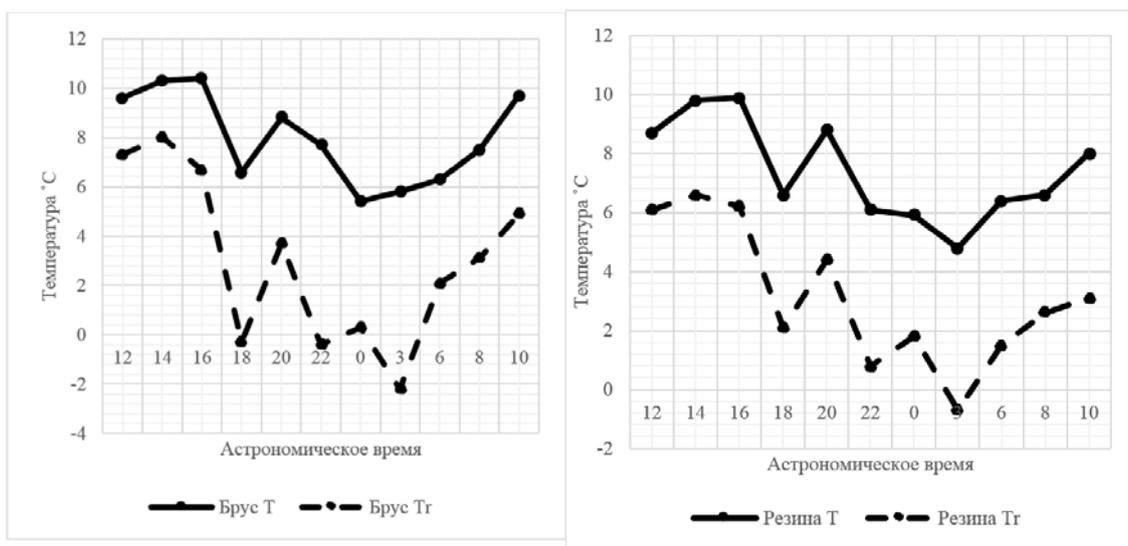


Рис. 4. Изменение радиационной и термодинамической температуры для материала – автомобильная резина.

Графики изменения радиационной и термодинамической температуры для материалов – деревянный брус (окрашенный в черный цвет), резина представлены на рисунке 5.



а) б)

Рис. 5. Графики изменения радиационной и термодинамической температур для материала – а) деревянный брус, окрашенный в черный цвет; б) резина.

Сопоставление графиков изменения радиационных температур для сочетания разнородных материалов «брус - резина» и «металл – бетон», приведены на рисунках 6,7.



Рис. 6. Графики изменения радиационных температур для двух разнородных материалов – деревянный брус, окрашенный в черный цвет и резина.



Рис. 7. Графики изменения радиационных температур для двух разнородных материалов – металлический диск, окрашенный в черный цвет и бетон.

Теоретическая часть

На основании закона Стефана-Больцмана, пересчет яркости ИК-изображений в значения радиационных и термодинамических температур производится в соответствии с выражениями [4]:

$$T_r = T_{r0} + \frac{I \cdot \Delta T_{r\text{э}}}{\Delta I_{\text{э}}}, \quad (1)$$

$$T = \left(\frac{|T_r^4 - (1 - \varepsilon) T_A^4|}{\varepsilon} \right)^{0.25}, \quad (2)$$

где T_r - радиационная температура; $T_{r0} = (\varepsilon T_0^4 + (1 - \varepsilon) T_A^4)^{0.25}$ - начальная радиационная температура; $T_0 = \frac{1}{2} \left(T_{1\text{э}} + T_{2\text{э}} - \frac{(I_{1\text{э}} + I_{2\text{э}}) \Delta T_{\text{э}}}{\Delta I_{\text{э}}} \right)$ - начальная термодинамическая температура; I - яркость текущего пиксела ИК-изображения; $\Delta T_{r\text{э}} = \Delta T_{\text{э}} \varepsilon^{0.25} = |T_{1\text{э}} - T_{2\text{э}}| \varepsilon^{0.25}$ - разность радиационных температур на эталонах 1 и 2; $\Delta I_{\text{э}} = |I_{1\text{э}} - I_{2\text{э}}|$ - разность яркостей на эталонах 1 и 2; T - термодинамическая температура; ε - коэффициент излучательной способности; T_A - температура окружающего воздуха.

Заключение.

Проведенный эксперимент и последующий анализ его результатов позволил сформулировать следующие выводы:

1. Пересчет значения радиационной температуры в термодинамическую связано с систематической ошибкой, которая имеет минимальное значение в 20:00 и 16:00.

2. Наибольшее различие материалов «деревянный брус окрашенный, в черный цвет» и «резина» по термодинамическим температурам, наблюдается в 10:00. Проявлением эффекта инверсии температурных (тепловых) контрастов происходит в период с 16:00 до 06:00.

3. Наибольшее различие материалов «металлический диск, окрашенный в черный цвет» и «бетон» по термодинамическим температурам, наблюдается в 10:00. Проявление эффекта инверсии температурных (тепловых) контрастов происходит в период с 20:00 до 06:00.

Список литературы

1. **Студитский А.С.** Исследование и разработка многофункционального оптико-электронного средства наблюдения и разведки. М.: НИИ и МНПО «Спектр», 2013. – 112 с.

2. **Ищук И.Н.** Алгоритм совместной обработки многоспектральных изображений по данным воздушной съемки с беспилотных летательных аппаратов / И.Н. Ищук, А.М. Филимонов, А.А. Долгов, Е.А. Степанов, В.Н. Тяпкин // Промышленные АСУ и контроллеры. 2018. № 10. – С. 27– 34.

3. **Жендарев М.В., Якименко И.В., Гурченков Д.А.** Способ обнаружения тепловых объектов. Статья. Сборник материалов докладов X Международной конференции «Системы компьютерной математики и их приложения». Смоленск: Смоленский государственный университет, 2009. – С. 112– 113.

4. **Журнал** Сибирского федерального университета. Техника и технологии, 2019, 12(6).– С. 683– 693.

Aytakin Guluzade¹, Javid Safarov²

¹Azerbaijan Technical University, H. Javid Avn. 25, AZ-1073 Baku, Azerbaijan; ²Institute of Technical Thermodynamics, University of Rostock, Albert-Einstein-Str. 2, D-18059 Rostock, Germany

Density of 1-butyl-3-methylimidazolium trifluoromethanesulfonate and methanol binary mixtures

Keywords: Ionic liquid, density, excess molar volume, apparent molar volume, thermophysical properties.

Abstract: Ionic liquids and their various organic solutions have wide range application in the chemical, mechanical, medical etc. industries. To use of ionic liquids and their organic solutions as heat transfer fluids in the solar heating and absorption refrigerating systems is one of them. Such application of substances requires high quality thermophysical properties.

Introduction

Ionic liquids (ILs) and ILs-containing mixtures involves the development of chemical products and synthetic procedures, which are environmentally friendly and have reduced health risks with the search for more efficient methods to do chemistry. Binary mixtures of ILs and other fluids have been used for electrochemical applications (solar cells), heat transfer fluid in solar heating systems and considerable improved the performance in the device [1-3]. The various ILs and their alcohol or other organic liquids binary solutions were widely investigated in this research work for the applying of them as thermal storage media and heat transfer fluids (HTF). In this case, this practical application area are discussing here in wide range. ILs are claimed to be useful as thermal storage media and HTF in solar heating and absorption refrigerating systems, where high heat capacity, low volatility and good thermal stability of them ploy important role. Also, low vapor pressures, viscosity, corrosivity are important requirements. The solar energy system costs are strongly dependent on the properties of thermal storage media and heat transfer fluid. Suitable heat transfer fluids of these systems must be thermally stable, chemically resistant and crystallization should be avoided. The use of ILs in solar heating and absorption refrigerating systems

allows operation below the freezing point of water. For most industrial applications, water is the most popular heat transfer fluid (high thermal conductivity, high heat capacity, high density, moderate viscosity, high latent thermal energy). The biggest problem with water as a HTF is the limited range of temperature (less than 373.15 K, high vapor pressure near the boiling temperature) over which it can be used. The extension of the application temperature range to below freeze point can be made by using antifreeze (ethylene glycol-water mixture), however the extension over the boiling point of the aqueous system is extremely difficult. High pressure is needed to keep water in the liquid state when the temperature is over 373.15 K, which is causing very high costs for the related pressure vessels and pipes. Gases are used as HTF instead of water when a wider temperature range is required, although have low density, low heat capacity, and low thermal conductivity. These properties make gaseous heat transfer fluids not as effective as liquid. Energy storage is a critical factor in the advancement of solar technologies that produce electricity using directly as the energy sources. Operational characteristics for solar parabolic trough energy systems strongly depend on thermal storage options. Collected thermal energy can be transferred from the HTF to storage media or stored in a reservoir using the heat capacity of the HTF itself.

Use of the mixtures of ILs with other compounds (organic solvents, alcohols and water, for example) as HTF is allowed to change and control the mixtures properties that suitable to given situation. The utilization of ILs and their mixtures with other fluids (organic solvents and water, for example) in industrial chemistry requires a systematic study of their thermodynamic and transport properties, which are extremely needed for chemical process design. The volumetric properties (density, excess, apparent and partial molar volumes) providing very useful information on the structural and intermolecular interaction between the solvent and solute molecules with different sizes, shapes, and chemical nature.

Experiments

The density $\rho(p_{0\text{or }s}, T, x)$ of binary $\{(1-x)[\text{BMIM}][\text{TFO}] + x\text{CH}_3\text{OH}\}$ solutions at ambient and saturated pressures were measured using an Anton Paar DSA 5000M, DMA 4500, DMA HPM and SVM 3000 vibration tube densimeters in the temperature range $T=(283.15 \text{ to } 413.15) \text{ K}$ using Anton Paar DSA 5000M, DSA 5000M and DMA HPM vibrating tube densimeters with an uncertainty of $\Delta\rho = \pm (5 \cdot 10^{-3} \text{ to } 3 \cdot 10^{-1}) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. The densimeters DSA 5000M and DMA 5000M (except DMA HPM) used to measure of the density at atmospheric pressure include an automatically correcting effect of viscosity on the measured density values. The physical bases of all these densimeters are the same, with differences only in some improvements made by the manufacturer, which results in an increase in the accuracy of the thermostating (temperature control and sample temperature measurements) when using new electronics, material and optimal size of the tubes, etc. For example, modern DSA 5000 M is a vibrating tube sound analyzer and densimeter with a certified precision of $\Delta\rho = \pm 5 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

An empiric equation of state for fitting of the density data of $[\text{BMIM}][\text{TFO}]$ and methanol solutions has been developed as a function of temperature. This equation was used for the calculation of various thermophysical properties of mixtures for example the excess molar volumes $V_m^E / \text{cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ and apparent molar volume $V_\phi / \text{cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$. The densities of pure $[\text{BMIM}][\text{TFO}]$ and methanol, which need to analyse the properties of solutions were measured in our laboratory and through compared with the all possible literature values in last century.

Excess molar volume

Excess molar quantities are properties of mixtures, which characterize the nonideal behaviour of real mixtures. Excess molar volumes are the difference between the real partial molar volume of the mixture and the ideal partial molar volume.

The excess molar volumes $V_m^E/\text{cm}^3\cdot\text{mol}^{-1}$ of $\{(1-x) [\text{BMIM}][\text{TFO}]+x\text{CH}_3\text{OH}\}$ were calculated from experimental density values of solutions at ambient $p=0.101$ MPa or saturated p_s pressures using eqn. (1):

$$V_m^E = \{xM_a + (1-x)M_{\text{IL}}\} / \rho - xM_a / \rho_a - (1-x)M_{\text{IL}} / \rho_{\text{IL}}, \quad (1)$$

where: V_m^E is the excess molar volume of solution, x is mole fraction of pure methanol, M_a and M_{IL} are the molar masses, ρ_a and ρ_{IL} are the densities of pure methanol and $[\text{BMIM}][\text{TFO}]$, respectively.

Apparent molar volume

Excess molar quantities are properties of mixtures, which characterize the nonideal behaviour of real mixtures. Excess molar volumes are the difference between the real partial molar volume of the mixture and the ideal partial molar volume.

The apparent molar volumes V_ϕ of the $[\text{BMIM}][\text{TFO}]$ in methanol were calculated by the eqn. (2):

$$V_\phi = 1000(\rho_m - \rho_s) / (m\rho_s\rho_m) + M/\rho_s, \quad (2)$$

where: ρ_m and ρ_s are densities of methanol and solution in $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, m is the molality of solution in $\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ and M is the molar mass of the dissolved IL in $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$.

The apparent molar volume of IL at infinite dilution V_ϕ^0 at constant temperature T and pressure p can be evaluated from the following equation:

$$V_\phi = V_\phi^0 + A_v m^{1/2} + B_v m, \quad (3)$$

where: V_ϕ^0 is the apparent molar volume of IL at infinite dilution, which is the same as the partial molar volume of IL at infinite dilution, A_v is the Debye-Hückel limiting slope, m is the molality, and B_v is an adjustable parameter. Redlich *etc.* [4-5] attempted to prove the Masson hypothesis for deriving of A_v by using Debye-Hückel theory [6]:

$$A_v = k_w^{3/2} \quad (4)$$

where: k and w were expressed as:

$$k = N_A^2 e^3 [(8\pi / 1000 D^3 RT)]^{1/2} [(\partial \ln D / dp) - \kappa_T / 3] \text{ and } w = 0.5 \sum_i \nu_i z_i^2, \quad (5)$$

where: N_A is Avogadro's number, e is the electric charge, D is the dielectric constant of the solvent (methanol), R is the universal gas constant, T is the absolute temperature, κ_T is the compressibility of the solvent (methanol), ν_i is the number of ions of species i and valency z_i formed by one molecule of electrolyte. According to (5) for an electrolyte of a fixed valence type, w is constant and the limiting slope A_v depends only on temperature and the physical properties of the solvent (methanol) D , $(\partial \ln D) / dp$ and κ_T . As a rule, this relationship is applied at fixed pressure p and temperature T . The infinite-dilution values of V_ϕ^0 are obtained by polynomial extrapolating eqn. (3) to zero molality of solution ($m = 0$). The compressibility κ_T of the solvent (methanol) were taken from our laboratory density experiments, which were through compared with last 100 year literature values.

Conclusions

Densities of $\{(1-x)[\text{BMIM}][\text{TFO}] + x\text{CH}_3\text{OH}\}$ binary solutions have been measured with vibrating-tube densimeter. The volumetric properties (excess and apparent molar volumes) were calculated using the measured densities as a function of temperature, pressure, and concentration. The measured density data were used to develop empiric polynomial equation of state for the mixture.

References

1. Wang P., Wenger B., Humphry-Baker R., Moster J.-E., Teuscher J., Kantlehner W., Mezger J., Stoyanov E.V., Zakeeruddin S.M., Graetzel M. 2005, *J. Am. Chem. Soc.* 127, 6850-6856.

2. **Wang P.**, Zakeeruddin S.M., Humphry-Baker R., Graetzel M. 2004, *Chem. Mater.* 16, 2694-1696.
3. **Van Valkenburg**, M.E.V., Vaughn R.L., Williams M., Wilkes J.S. 2005, *Thermochim. Acta* 425, 181-188.
4. **Redlich O.**, Rosenfeld P. 1931, Das partielle molare Volumen von gelösten Elektrolyten, I. *Zeitschrift für physikalische Chemie*, 155, Abt. A, 1, 65-99.
5. **Redlich O.**, Meyer D.M. 1964, The molal volumes of electrolytes, *Chemical Reviews*, 64, 3, 221-227.
6. **Debye P.**, Hückel E. 1923, Zur Theorie der Elektrolyte. I. Gefrierpunktserniedrigung und verwandte Erscheinungen. *Physikalische Zeitschrift*, 9, 185-206.

**Зафар Юлдошевич Норов¹, Тахмина Рустамовна Тиллоева²,
Махмадали Махмадиевич Сафаров³
Zafar U. Norov¹, Tahmina R. Tilloeva², Mahmatali M. Safarov³**

¹Таджикский государственный педагогический университет им. С. Айни, Душанбе, Таджикистан, ²Таджикский технический университет имени акад. М.С. Осими, Душанбе, Таджикистан, ³Таджикский технический университет имени акад. М.С.Осими, Душанбе, Таджикистан

¹Tajik developments pedagogical university by named S.Aini, Dushanbe, Tajikistan, ²Tajik technical university by named akad. M.S.Osimi, Dushanbe, Tajikistan, ³Tajik technical university by named akad. M.S.Osimi, Dushanbe, Tajikistan

Норов Зафар Юлдошевич - соискатель кафедры “Общая физика” ТГПУ имени Садриддина Айни; **Тиллоева Тахмина Рустамовна** - к.т.н., кафедры “Теплотехника и теплоэнергетика” ТТУ им. акад. М.С. Осими; **Сафаров Махмадали Махмадиевич** - д.т.н., профессор кафедры “Теплотехника и теплоэнергетика” ТТУ им. акад. М.С. Осими.

Norov Zafar Yuldoshevich - candidate of the Department of "General Physics" of Sadrididin Aini TSPU; **Tilloeva Tahmina Rustamovna** - Candidate of Technical Sciences, Department of "Heat Engineering and Heat Power Engineering" of the TTU named after M.S. Osimi; **Safarov Makhmadali Makhmadievich** - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of "Heat Engineering and Heat Power Engineering" of M.S. Akad. Osimi.

Влияние термического нанопорошка на изменение удельного сопротивления и электропроводности воды при высоких параметрах состояния

The effect of thermal nanopowder on the change in the resistivity and electrical conductivity of water at high state parameters

Ключевые слова: вода, электропроводность, удельное сопротивление, концентрация, наноразмерный термический порошок.

Аннотация: в статье приводятся результаты экспериментального исследования электрофизических свойств (удельного сопротивления, электропроводности) на основе термического нанопорошка, введенного в воду, в зависимости от температуры, давления и концентрации наночастиц. Результаты исследования показали, что добавки наночастиц в воде увеличивают электрофизические свойства теплоносителя. Общая относительная погрешность измерения удельного сопротивления и электропроводности составляет 2,4% соответственно при доверительной вероятности 0,95. На основе данных по электро-физическим свойствам и термическому нанопорошку получены эмпирические уравнения.

Keywords: water, electrical conductivity, resistivity, concentration, nanosized thermal powder.

Abstract: the article presents the results of an experimental study of electrophysical properties (resistivity, electrical conductivity) based on thermal nanopowder introduced into water depending on the temperature, pressures and concentration of nanoparticles. The results of the study showed that the addition of nanoparticles in water increases their electrophysical properties of the coolant. The total relative error in resistivity measurement is 2.4%, respectively, with a confidence level of 0.95. Empirical equations are obtained on the basis of data on electrophysical properties and thermal nanopowder.

Появился целый ряд новых технологических процессов, протекающих при высоких температурах и давлении, что послужило основанием для совершенствования и интенсификации ранее существующих процессов, применяемых в химической, топливной, машиностроительной и других отраслях.

В процессе механического и теплового разрушения радиаторов автомобилей появляются трещины или швы. Обычно для того, чтобы избежать последствий от них, в теплоноситель (вода или антифриз) при определенных температуре и атмосферном давлении добавляют некоторое количество терметического нанопорошка (далее герметик (ТНП)). При работе двигателя внутреннего сгорания нанопорошок в теплоносителе растворяется, и часть его заполняет швы или трещины.

Поэтому результаты исследования теплофизических (теплопроводности, удельной теплоемкости), электрофизических (удельного электросопротивления, электропроводности) и кинетических (коэффициента адсорбции, коэффициента массопереноса и коэффициента набухания) свойств легли в основу современной молекулярно-кинетической теории газов и жидкостей.

Целью данного исследования является изучение удельного сопротивления, электропроводности, системы воды (дистиллированная и водопроводная, и родниковая вода Ширгина, Вранга, Зонга, Ямчуна) и терметического нано-порошка (до 2 г.) в интервале температур (293-413) К и давлений (0,101-14,52) МПа.

Объект исследования. Вода дистиллированная, родниковая (Ширгина, Ямчуна, Вранга, Зонга) и некоторые модельные образцы пэнтэласта и термических нанопорошков.

Отрасль исследования. Исследование электропроводности системы воды (дистиллированная и водопроводная, и родниковая (Ширгина, Вранга, Зонга, Ямчуна) и термического нанопорошка (до 12г.) в интервале температур (293-413) К и давлений (0,101-14,52) МПа.

Устройство для определения электрофизических свойств магнитных жидкостей в зависимости от давления и магнитного поля (Патент РТ №ТJ 372)

В комплект основных приборов устройства входят: ЛАТР, электроды, соединенные с ЛАТРОм и амперметром, переменный резистор, имеющий последовательное соединение с соленоидом (катушка), измерительная ячейка из полиэтилена, установленная внутри катушки и соединенная с тонометром и реостатом. Образец для проведения экспериментов размещается непосредственно внутри измерительной ячейки. Разработанное устройство имеет измерительное предназначение, т.е. на ней измеряется электропроводность магнитных жидкостей при температуре окружающей среды (комнатной) и воздействии магнитного поля.

В состав устройства, предназначенного для экспериментальных целей по измерению температуропроводности магнитных жидкостей, входят следующие измерительные приборы: лазерная установка, штатив для установки измерительной ячейки, термopара (хромель-алюмелевая), микровольтнано-амперметр, ЛАТР, амперметр с переменным резистором, имеющим последовательное соединение к соленоиду (катушка индуктивная), танометр, соединенный с измерительной ячейкой. В ячейке размещается непосредственно изучаемое вещество (материал).

Преследуемая цель реализуется путем применения в установке ЛАТРа 7, который посредством двух электродов 1 имеет соединение с амперметрами 5, переменным резистором 8 и соленоидом 3 (катушка). Внутри него

устанавливается измерительная ячейка 2 из полиэтилена, в которую непосредственно загружается образец для исследования, а она, в свою очередь, имеет соединение с тонометром 4 и реостатом 6 (рисунок 1).

Устройство работает следующим образом:

В измерительную ячейку загружается образец, предназначенный для исследования, сверху которой подключают тонометр, а снизу электроды. После того как в закрепленной на штативе катушке размещают ячейку с образцом проверяют на предмет отсутствия контакта ее дна с катушкой. С помощью ЛАТРа подается напряжение от 3 до 8 В, после чего в соленоиде образуется магнитное поле, и посредством тонометра изменяется рабочее давление от 0,1 до 29,34 МПа. Переменный резистор в установке служит для контроля силы тока в пределах от 0,4 до 0,97 А по амперметру, переменный резистор 8 и амперметр 5 соединяют последовательно к катушке 3.

Возникший ток между электродами после подачи напряжения регистрируется амперметром.

Для определения электрофизических характеристик исследуемых растворов в зависимости от температуры и давления использовали разработанную нами экспериментальную установку, запатентованную в ТаджНИТИ г. Душанбе за номером (№ТJ 923). Результаты определения электрофизических свойств растворов системы родниковые воды и герметик (ТНП) в интервале температур (293-413) К и давления ($p = 0,101-14,52$) МПа графически показаны на рисунках 2 и 3. В качестве растворителей использовали родниковые воды родников Ширгина, Вранга, Зонга и Ямчуна. Согласно рисункам 2 и 3 таблиц 2-5, их результаты были получены экспериментальным путем, можно заключить, что с ростом температуры коэффициент эффективной теплопроводности исследуемых растворов системы (вода + герметик (ТНП)) растет по линейному закону, а также добавки по росту теплопроводности исследуемой системы.

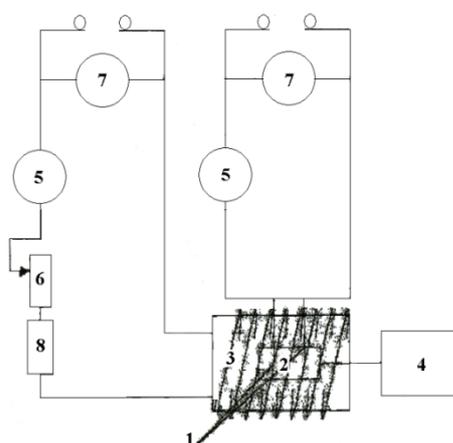


Рис. 1. Блок-схемы экспериментальной установки для измерения электрофизических свойств электролитов при атмосферном давлении.

Например, для образца №6 (вода родника «Ширгина»+12 г.(ТНП) при температуре 293 К удельное сопротивление растёт на 6,52%, при 360 К – σ растёт на 7,66 %, а при 415 К это изменение доходит до 8,76 %.

Результаты экспериментального исследования удельного сопротивления и электропроводности исследуемых растворов на основе воды родниковой из родников Республики Таджикистан (Ширгин, Вранг, Зонг, Ямчун и воды реки Душанбе) в зависимости от температуры.

Надо отметить, что удельное электросопротивление и электропроводность системы герметик и вода реки Душанбе ранее исследовал к.т.н., доцент кафедры “Физика” ТГУ имени акад. М.С. Осими Аминов Ш.А. Результаты его исследований приведены ниже [1, 2].

В таблице 1 и рис. 2 и 3. представлены результаты экспериментального исследования удельного электросопротивления, электропроводности исследуемых растворов системы герметик (ТНП)+вода родниковых вод (родников Зонга, Вранга, Ширгина, Ямчуна) в интервале температур (293–338) К при атмосферном давлении ($p = 0,101$) МПа.

Результаты исследований показали, что с повышением температуры электросопротивление растворов уменьшается по закону прямой линии, параболическому и экспоненциальному, а электропроводность увеличивается.

Введение в состав раствора термического нанопорошка повышает его электропроводность.

Как было ранее отмечено, электрофизические характеристики во многом зависят от типа растворителя (в нашем случае дистиллированная, питьевая и родниковая вода).

Таблица 1. Удельное электросопротивление и электропроводность системы родни-ковая вода “Вранга” + термический нанопорошок (ТНИ) в зависимости от температуры [3-5].

Т, К	293	298	303	308	313	318	323	328	333	338
Образец №1.										
χ , Ом·м	4,785	4,545	4,237	4,115	3,597	3,436	3,279	3,144	3,106	2,985
σ , См·м ⁻¹	0,209	0,220	0,236	0,243	0,278	0,291	0,305	0,318	0,322	0,335
Образец №2.										
χ , Ом·м	4,404	4,202	3,846	3,636	3,344	3,125	3,106	3,021	2,949	2,890
σ , См·м ⁻¹	0,227	0,238	0,260	0,275	0,299	0,320	0,322	0,331	0,339	0,346
Образец №3.										
χ , Ом·м	4,184	4,000	4,273	3,922	3,676	3,610	3,413	3,165	3,067	2,967
σ , См·м ⁻¹	0,239	0,250	0,234	0,255	0,272	0,277	0,293	0,316	0,326	0,337
Образец №4.										
χ , Ом·м	4,082	3,356	3,195	3,075	3,165	2,967	2,747	3,075	2,638	2,632
σ , См·м ⁻¹	0,242	0,298	0,313	0,325	0,316	0,337	0,364	0,325	0,379	0,380
Образец №5.										
χ , Ом·м	2,941	2,933	2,817	2,754	2,667	2,610	2,538	2,463	2,326	2,227
σ , См·м ⁻¹	0,340	0,341	0,355	0,363	0,375	0,383	0,394	0,406	0,430	0,449
Образец №6.										
χ , Ом·м	2,907	2,739	2,597	2,500	2,398	2,336	2,273	2,208	2,114	2,053
σ , См·м ⁻¹	0,344	0,365	0,385	0,400	0,417	0,428	0,440	0,453	0,473	0,487

Образец №1- {H₂O” Вранга”+2г.ТНП}; **№2**- {H₂O”Вранга”+4г.ТНП};
№3- {H₂O ”Вранга ” +6г.ТНП}; **№4**- {H₂O”Вранга”+8г.ТНП}; **№5**-
{H₂O”Вранга”+10г.ТНП}; **№6**- {H₂O”Вранга”+ 12г.ТНП}.

Таблица 2. Удельное электросопротивление и электропроводность системы родниковая вода “Ямчуна” + термический нанопорошок (ТНП) в зависимости от температуры [3-5].

Т, К	293	298	303	308	313	318	323	328	333	338
Образец №1.										
χ , Ом·м	3.584	3.448	3.268	3.194	2,873	2,762	2,667	2,577	2,551	2,469
σ , См·м ⁻¹	0,279	0,290	0,306	0,313	0,348	0,362	0,375	0,388	0,392	0,405
Образец №2.										
χ , Ом·м	3.367	3,247	3,030	2.899	2,710	2.564	2,538	2.494	2,445	2,404
σ , См·м ⁻¹	0,297	0,308	0,330	0,345	0,369	0,390	0,394	0,401	0,409	0,416
Образец №3.										
χ , Ом·м	3,236	3.125	3.289	3,077	2,924	2.882	2.755	2,591	2.525	2,457
σ , См·м ⁻¹	0,309	0,320	0,304	0,325	0,342	0,347	0,363	0,386	0,396	0,407
Образец №4.										
χ , Ом·м	3.205	2,717	2.611	2.531	2.890	2,591	2,358	2,531	2,227	2,222
σ , См·м ⁻¹	0,312	0,368	0,383	0,395	0,386	0,417	0,424	0,395	0,449	0,450
Образец №5.										
χ , Ом·м	2,381	2,375	2.299	2,257	2,247	2,159	2,109	2,058	1,961	1.890
σ , См·м ⁻¹	0,420	0,421	0,435	0,443	0,455	0,463	0,474	0,486	0,510	0,529
Образец №6.										
χ , Ом·м	2,358	2,247	2,151	2,083	2,012	1,969	1.923	1.876	1.808	1,733
σ , См·м ⁻¹	0,424	0,445	0,465	0,480	0,497	0,508	0,520	0,533	0,553	0,577

Образец №1- {H₂O ”Ямчуна”+2г.ТНП}; **№2**- {H₂O ”Ямчуна”+4г.ТНП};
№3- {H₂O ”Ямчуна ”+6г.ТНП}; **№4**- {H₂O ”Ямчуна”+8г.ТНП}; **№5**-
{H₂O ”Ямчуна”+10г.ТНП}; **№6**- {H₂O ”Ямчуна”+ 12г.ТНП}.

В таблицах 1, 2 и рисунках 2 и 3 представлены результаты экспериментальных исследований удельного электросопротивления и электропроводности увлажненного термического нанопорошка (ТНП) родниковыми водами Ширгина, Вранга, Зонга и Ямчуна в интервале температур (293-338) К и атмосферном давлении. Масса термического нанопорошка в исследуемых системах составляла 0-12 г. Как видно по итогам

расчетно-аналитических и экспериментальных опытов, с ростом массы герметика (ТНП) удельное сопротивление наряду с температурой повышается по гиперболическом закону, а электропроводность, наоборот, уменьшается. Например, для образца системы (8 гр.+вода родника Ямчуна) при изменении температуры от 293 до 338 К удельное электро-сопротивление уменьшается на 44,2%, а электропроводность соответственно растет на 44,4 %- для дистиллированной воды:

$$\chi = \left[(Ci) + Bi \left(\frac{T}{T_1} \right) \right] \left((Di)m^2 + (Ei)m + (Fi) \right), \text{ Ом} \cdot \text{м} \quad (1)$$

По уравнениям (1) - (2), зная массу герметика, можно вычислить электрофизические свойства (удельное электросопротивление и электропроводность) экспериментально не исследованных систем воды (дистиллированной, водопроводной) в зависимости от температуры при атмосферном давлении с погрешностью 3,5%. Аналогично, для расчета электро-проводности родниковой воды из родников Ширгина, Вранга, Зонга и Ямчуна нами получен ряд аппроксимационных зависимостей. Значения коэффициентов уравнений (1), (2) для увлажнителей герметиков (ТНП) приведены в виде таблиц (таблица 3).

Сравнение вычисленных значений электрофизических свойств системы вода + герметик (термического нанопорошка (ТНП)) (по уравнениям (2) - (3)) в интервале температур (293-413) К.

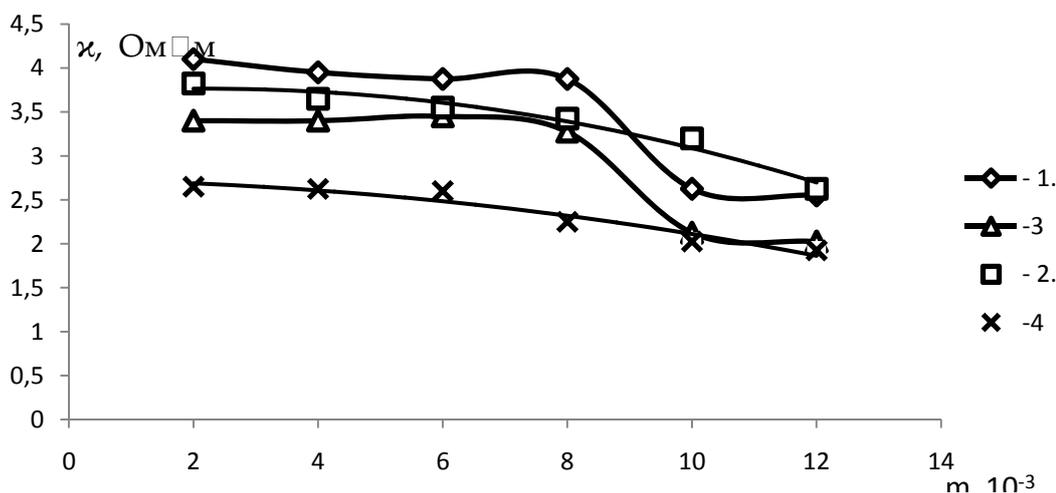


Рис. 2. Удельное электросопротивление системы (вода родника “Зонга”+герметик) в зависимости от массы растворенного герметика, атмосферного давления при различных температурах: 1-293К; 2-308К; 3-328К; 4-338К.

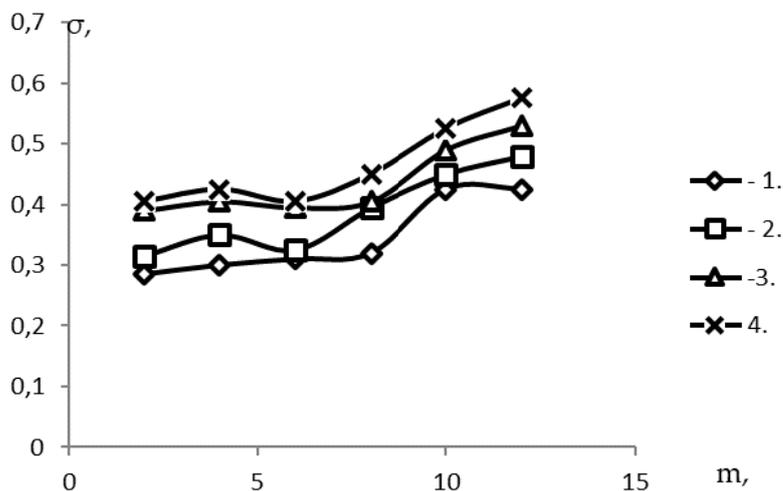


Рис. 3. Электропроводность системы (вода родника “Ширгина”+герметик) в зависимости от массы растворенного герметика, атмосферного давления при различных температурах: 1-293К; 2-308К; 3-328К; 4-338К.

$$\sigma = \left[Ai \left(\frac{T}{T_1} \right)^2 + Bi \left(\frac{T}{T_1} \right) + Ci \right] \left((Di)m^2 + (Ei)m + Fi \right), \text{См} \cdot \text{м}^{-1} \quad (2)$$

Таблица 3. Значения A_i , B_i , C_i , D_i , E_i и F_i уравнений (1) - (2).

№	Формулы	Коэффициенты уравнения (1) - (2).					
		A_i	B_i	C_i	D_i	E_i	F_i
Вода родника “Ширгина”							
1	(1)	4,125	-3,13	0	-13878	48,9	3,99

2	(2)	13,32	-23,4	-11,04	-1689,3	-9,46	0,298
			Вода родника “Вранга”				
3	(1)	4,125	-3,13	0	-13898	49,9	4,09
4	(2)	13,32	-23,4	-11,04	-1699,3	-9,66	0,308
			Вода родника “Зонга”				
5	(1)	4,125	-3,13	0	-13998	50,9	4,19
6	(2)	13,32	-23,4	-11,04	-1700,3	-9,86	0,318
			Вода родника “Ямчуна”				
7	(1)	4,125	-3,13	0	-13999	51,9	4,29
8	(2)	13,32	-23,4	-11,04	-1709,3	-9,97	0,328

Выводы

Составлены подробные таблицы электропроводности и удельного сопротивления пентаэласт, внедренных в воде, использованы при инженерных расчетах, при составлении физических моделей в зависимости от температуры и коэффициента увлажнения.

Полученные уравнения используются студентами, магистрантами и аспирантами кафедры «Общая физика» Таджикского государственного педагогического университета им. Садриддина Айни, кафедры «Теплотехника и теплоэнергетика» Таджикского технического университета им. академика М.С. Осими при выполнении лабораторных, курсовых, дипломных и диссертационных работ.

Список литературы

1. **Аминов Ш.А.** Теплофизические, электрофизические и термодинамические свойства системы “вода+герметик (пентаэласт-1161)” в зависимости от температуры и давления. // Шамсуло Асоевич Аминов / Автореферат к.т.н., Казань, 2014. - 21 с.

2. **Аминов Ш.А.** Влияние герметика на изменение электропроводности воды. / Ш.А. Аминов, М.А.Зарипова, Ш.З.Нажмудинов, М.М. Сафаров // Материалы IV Международной научно-практической конференции «Перспективы развития науки и образования» - 20-22 мая 2010 года – Душанбе – С. 219 - 223.

3. **Аминов Ш.А.**, Влияние герметика на изменение тепло- и электрофизических свойств воды. / Ш.А. Аминов, М.М. Сафаров, М.А. Зарипова, Ш.З. Нажмудинов. // (Монография). Изд. Хочи Хусейн. Душанбе, 2011, 143 с.

4. **Аминов Ш.А.** Влияние герметики на изменение электропроводности воды. / Ш.А. Аминов, М.М. Сафаров, М.А. Зарипова, Ш.З. Нажмудинов // Материалы Международной НПК “Перспективы развития науки и образования” - Душанбе, 2010. - С.219 - 224.

5. **Аминов Ш.А.** Влияние герметики на изменение электро- и теплопроводности воды и некоторых водных растворов. / Ш.А. Аминов, М.М. Сафаров, М.А. Зарипова, Ш.З. Нажмудинов, М.М. Анакулов, Т.Р. Тиллоева, Х.А. Зоиров. // Материалы 7 Международной теплофизической школы “Теплофизические исследования и измерения в энергосбережении, при контроле, управлении и улучшении качества продукции, процессов и услуг” Ч.1, Тамбов, 20-25 сентябрь. 2010, - С.100 - 101.

**Наджибулло Бахромович Давлатов¹, Виталий Алексеевич Алтунин²,
Юрий Федорович Гортышов², Мохира Абдусаломовна Зарипова¹,
Махмадали Махмадиевич Сафаров¹**

**Najibullo B. Davlatov¹, Vitaly A. Altunin², Uriy. F. Gortishov², Mohira A.
Zaripova¹, Mahmatali M. Safarov¹**

*¹Таджикский технический университет имени акад. М.С.Осими,
Душанбе, Таджикистан; ²"КНИТУ-КАИ" имени А.Н.Туполева, г. Казань,
Россия*

*¹Tajik technical university by named akad. M.S.Osimi, Dushanbe,
Tajikistan; ²"KNITU-KAI" named after A.N. Tupolev, Kazan, Russia*

Давлатов Наджибулло Бахромович – к.т.н., заместитель начальника кот-лотурбинного цеха ДТЭЦ-2, г. Душанбе; **Алтунин Виталий Алексеевич** – д.т.н., профессор кафедры “Машино-строение и теплотехники”, “КНИТУ-КАИ” имени А.Н.Туполева, г. Казань; **Гортышов Юрий Федорович** – д.т.н., профессор Президент КАИ, “КНИТУ-КАИ” имени А.Н.Туполева, г. Казань; **Зарипова Мохира Абдусаломовна** - д.т.н., профессор кафедры “Теплотехника и теплоэнергетика” ТТУ имени акад. М.С. Осими, г. Душанбе; **Сафаров Махмадали Махмадиевич** - д.т.н., профессор кафедры “Теплотехника и теплоэнергетика” ТТУ имени акад. М.С. Осими, г. Душанбе.

Davlatov Najibullo Bahromovich – Candidate of Technical Sciences, Deputy Head of the turbine shop DT-2, Dushanbe; **Altunin Vitaly Alekseevich** - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of “Mechanical Engineering and Heat Engineering”, “KNITU–KAI” named after A.N.Tupolev, Kazan; **Gortyshov Yuri Fedorovich** - Doctor of Technical Sciences, Professor President of KAI, “KNITU-KAI” named after A.N.Tupolev, Kazan; **Zaripova Mokhira Abdusalomovna** – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of “Heat Engineering and Heat Power Engineering” of the M.S. Akad. Osimi, Dushanbe; **Safarov Makhmadali Makhmadievich** - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of "Heat Engineering and Heat Power Engineering" of the TTU named after M.S. Osimi, G. Dushanbe.

Применение способа проф. Алтунина В.А. и др. для определения вклада наночастиц на изменение теплофизических характеристик углеводородов

Application of the method prof. V.A. altunina e.t. for determining the contribution of nanoparticles to change in thermal characteristics of hydrocarbons

Ключевые слова: теплопроводность, теплоноситель, этиленгликоль, вода, концентрация, нанопорошок гидразина.

Keywords: thermal conductivity, coolant, ethylene glycol, water, concentration, hydrazine nanopowder.

Аннотация: В статье приводятся результаты экспериментально-теоретического исследования коэффициента эффективного теплопроводности углеводородов на его основе определены вклада наночастиц на изменение теплопроводности теплоносителей (способ проф. Алтунина В.А. и др.) Результаты исследование показывает, что внедрение наночастиц влияет на изменение коэффициента эффективного теплопроводности наножидкостей. Общая относительная погрешность измерения коэффициента эффективного теплопроводности составляет 3,2% при доверительной вероятности 0,95. На основе данных по коэффициенту эффективной теплопроводности некоторых углеводородов получены эмпирические уравнения.

Annotation: The article presents the results of an experimental-theoretical study of the coefficient of effective thermal conductivity of hydrocarbons, on its basis, the contribution of nanoparticles to the change in the thermal conductivity of heat carriers (method of prof. Altunin V.A. and others) is determined. The results of the study show that the introduction of nanoparticles affects the change in the coefficient of effective thermal conductivity of nanofluids. The total relative error in measuring the coefficient of effective thermal conductivity is 3.2% with a confidence level of 0.95. Empirical equations are obtained on the basis of data on the coefficient of effective thermal conductivity of some hydrocarbons.

Развитие нанотехнологий, разработка и создание наноматериалов выявило множество новых задач, связанных с их тепловыми свойствами. Открытие и изучение различных объектов наномира: наночастиц, нанопроволок и нанопроволочных сверхрешеток, нано-трубок, фуллерена, а также сложных наноматериалов на их основе (наножидкостей и нано-композитов, кластеров и наноагрегатов, «ковриков» из нанотрубок и т.д.) показало множество противоречий при использовании описания их тепловых свойств на базе классических закономерностей. Наконец, создание в последнее время сложных устройств на базе нано-объектов (нанотранзисторов, наноэлектро-механических устройств, нано термо электрических устройств и т.д.) требует серьезного анализа в них тепловых процессов.

Разработка высокоэффективной новой техники, технологии и материалов с заранее заданными свойствами для различных отраслей народного хозяйства, как и в целом для ускорения научно-технического

прогресса, невозможно без знания свойств веществ и материалов. Уровень развития промышленности характеризуется не только объемом производства и ассортиментом выпускаемой продукции, но и показателями ее качества. Одним из основных направлений повышения эффективности является улучшение качества используемых материалов и изделий.

Исследование теплофизических (плотность, теплопроводность, теплоемкость) и термодинамических (энтропия, энтальпия, внутренняя энергия, энергия Гиббса, энергия Гельмгольца) свойств веществ имеют давнюю историю. В последнее время эти исследования приобрели качественно новый характер. Для совершенствования и оптимизации технологических процессов необходимы научно обоснованные инженерные расчеты, которые нуждаются в информации о теплофизических и термодинамических свойствах рабочих веществ в широком интервале изменения параметров состояния. Использование недостоверных или даже приближенных данных по свойствам веществ в инженерных расчетах приводит к существенному завышению металлоемкости установок и снижению их технико-экономических показателей. В связи с этим, дальнейшее уточнение теплофизических и термодинамических свойств рабочих веществ представляет собой значительный резерв совершенствования технологических процессов [1, 2].

Актуальность данной работы заключается в том, что азотосодержащие жидкости являются компонентами ракетных топлив. Исследование теплофизических и термодинамических свойств азотосодержащих жидкостей, как в чистом виде, так и содержащих различное количество фуллеренов (C_{60}, C_{70}, C_{84}) дает возможность определить их рациональное использование в качестве рабочего тела и как ракетное топливо. Для составления уравнения состояния и подробных таблиц по свойствам азотосодержащих жидкостей с различной концентрацией фуллеренов необходимы данные по их теплофизическим и термодинамическим свойствам. Данная работа посвящена определению теплофизических

(плотность, теплопроводность и теплоемкость) и термодинамических свойств (изменение энтальпии, энтропии, внутренней энергии, удельной энергии Гиббса и энергии Гельмгольца) исследуемых систем при различных температурах, давлениях и концентрации фуллерена.

Для измерения теплопроводности чистого гидразина при различных температурах и давлениях был использован метод регулярного теплового режима первого рода. Результаты показаны на рисунках 1-3 [1, 2].

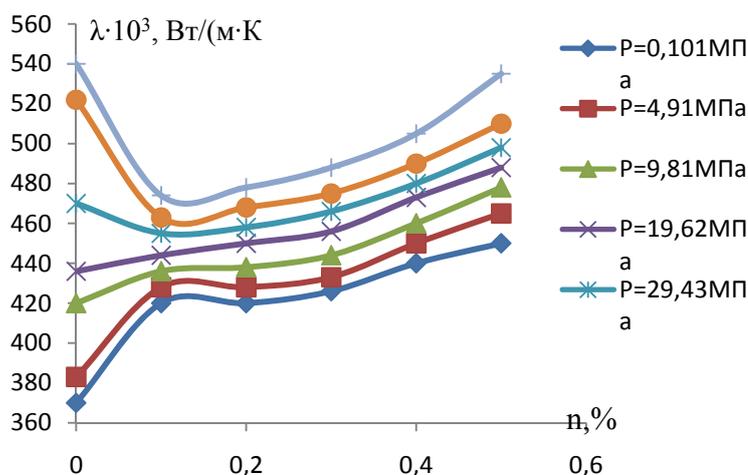


Рис. 1 - Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности жидкого «гидразин+фуллеренов» в зависимости от концентрации фуллерена и давления при температуре $T = 293$ К.

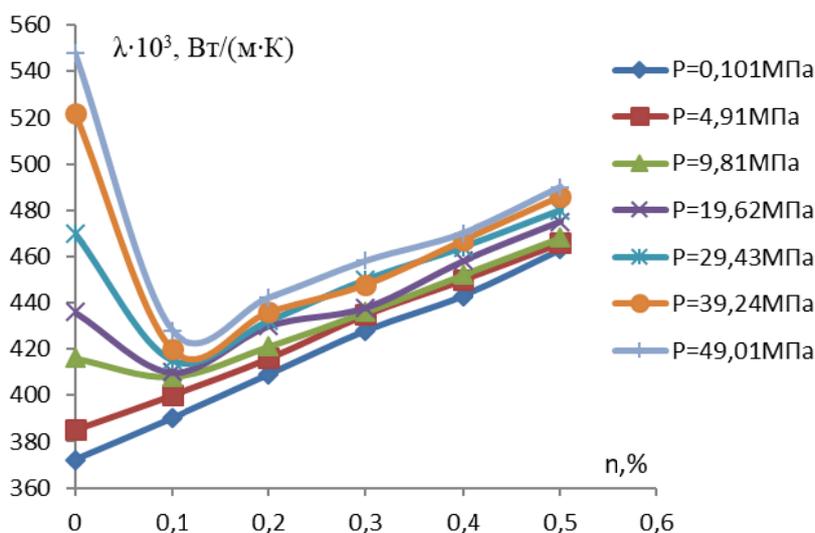


Рис. 2 - Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности жидкого «гидразин+фуллеренов» в зависимости от концентрации фуллерена и давления при температуре $T = 313$ К.

Для выявления вклада фуллеренов (C_{60}, C_{70}, C_{84}), на изменение теплопроводности коллоидных растворов системы чистого жидкого гидразина (см. табл. 4) с добавкой фуллеренов при различных температурах и давлениях, нами использованы следующие отношения:

$$\frac{\lambda}{\lambda_1} = f(T), \quad (5.1)$$

$$\frac{\lambda}{\lambda_1} = f(P), \quad (5.2)$$

где λ и λ_1 коэффициенты теплопроводности, соответственно жидкого гидразина с добавкой фуллеренов (C_{60}, C_{70}, C_{84}) и чистого жидкого гидразина при различных температурах и давлениях.

Численные расчёты отношений (1) и (2) для исследуемых растворов приведены в таблице 1, и рисунках 1-3.

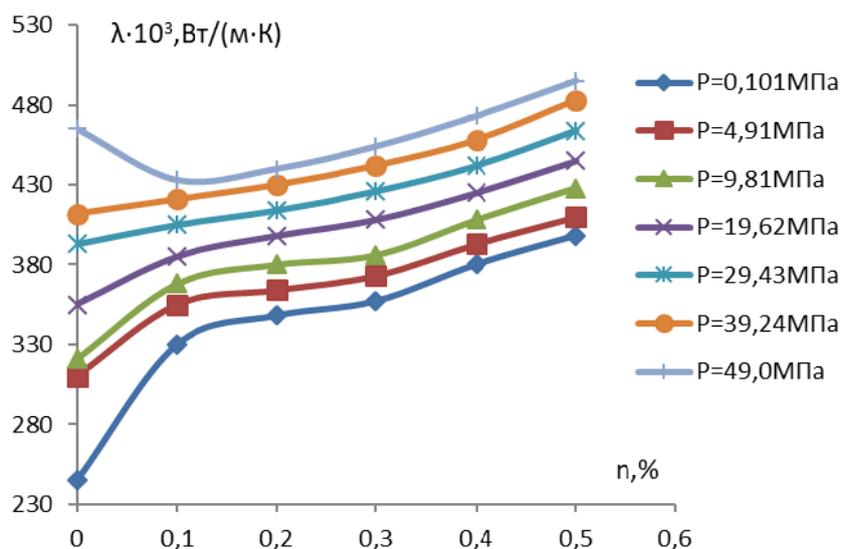


Рис. 3 - Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности жидкого «гидразин+фуллеренов» в зависимости от концентрации фуллерена и давления при температуре $T = 353$ К.

Как показывают графики на рисунках (1-3) влияние концентрации на теплопроводность при различных давлениях имеют различные закономерности. До давления $p = 9,81$ МПа теплопроводность растет по параболическому и линейному закону, а при давлении выше $P = 19,63$ МПа

теплопроводность вначале уменьшается, а потом растет по линейному закону.

Таблица 1 - Численные расчёты λ/λ_1 при различных температурах и давлениях коллоидных растворов системы гидразина и фуллеренов.

Т,К	P=0,101МПа		
	N ₂ H ₄ +0,5%С ₆₀	N ₂ H ₄ +0,5%С ₇₀	N ₂ H ₄ +0,5%С ₈₄
290	1,26	1,49	1,55
350	1,36	1,62	1,72
390	1,45	1,71	1,87
	P=4,91МПа		
290	1,21	1,44	1,58
350	1,27	1,57	1,69
390	1,33	1,64	1,73
433	1,42	1,78	1,85
473	1,52	1,92	1,97
513	1,65	1,99	2,04
553	1,90	2,10	2,21

Относительные коэффициенты числа Нуссельта системы «(гидразин + фуллерены) / гидразин» при различных давлениях и температурах (таблица 2.)

Таблица 2. - Относительные коэффициенты числа Nu системы «(гидразин + фуллерены) / гидразин» при различных давлениях и температурах.

Т,К	K _{Nu} (Т);		K _{Nu} (p)
	K _{Nu} (Т) (0,5 % С ₆₀); K _{Nu} (p) (0,5 % С ₆₀)	K _{Nu} (Т) (0,5 % С ₇₀); K _{Nu} (p) (0,5 % С ₇₀)	K _{Nu} (Т) (0,5 % С ₈₄); K _{Nu} (p) (0,5 % С ₈₄)
p = 0,101МПа			

293	0,819	0,707	0,683
313	0,797	0,681	0,664
333	0,772	0,662	0,639
353	0,754	0,643	0,612
373	0,706	0,608	0,562
p = 4,91МПа			
293	0,854	0,733	0,671
333	0,809	0,668	0,626
373	0,771	0,636	0,609
433	0,718	0,580	0,566
533	0,613	0,522	0,511
593	0,529	0,481	0,469
p = 9,81МПа			
293	0,908	0,782	0,7
333	0,866	0,728	0,661
373	0,822	0,701	0,647
433	0,773	0,661	0,618
533	0,674	0,592	0,551
593	0,612	0,536	0,502
p = 19,62МПа			
293	0,953	0,825	0,680
333	0,905	0,792	0,655
373	0,879	0,770	0,613
433	0,836	0,719	0,579
533	0,746	0,635	0,500
593	0,708	0,594	0,467
p = 29,43МПа			
293	0,992	0,863	0,694
333	0,960	0,834	0,663
373	0,943	0,813	0,642
433	0,909	0,774	0,608
533	0,862	0,726	0,551
593	0,819	0,685	0,517
p = 39,24МПа			
293	1,036	0,908	0,711
333	1,019	0,884	0,674
373	0,990	0,854	0,662
433	0,977	0,834	0,637
533	0,922	0,767	0,597
593	0,888	0,761	0,554
p = 49,01МПа			
293	1,093	1,114	0,712
333	1,077	1,053	0,694

373	1,061	1,025	0,674
433	1,043	1,032	0,662
533	1,024	1,013	0,627
593	0,991	0,967	0,601

Список литературы

1. **Давлатов Наджибулло Бахромович.** Влияние фуллеренов на изменение теплофизических и термодинамических свойств жидкого гидразина. /*Наджибулло Бахромович Давлатови* // Дис.....к.т.н., Душанбе, 297с.

2. **Алтуниин В.А.** и др. Некоторые пути повышения эффективности жидкостных реактивных двигателей летательных аппаратов на углеводородных и азотосодержащих горючих и охладителях (монография). Типография КАИ имени А.Н.Туполева, г.Казань. “Школа” , 2020.-148с.

Махмадали Махмадиевич Сафаров¹, Саехат Сайфуллоевна Раджабова², Тахмина Рустамовна Тиллоева¹, Мохира Абдусаломовна Зарипова¹

Mahmadali M. Safarov¹, Sayohat S. Rajabova², Tahmina R. Tilloeva¹, Mohira A. Zaripova¹

¹Таджикский технический университет имени акад. М.С.Осими, Душанбе, Таджикистан, ²Таджикский государственный педагогический университет им. С.Айни, Душанбе, Таджикистан

¹Tajik technical university by named akad. M.S.Osimi, Dushanbe, Tajikistan,

²Tajik developments pedagogical university by named S.Aini, Dushanbe, Tajikistan

Сафаров Махмадали Махмадиевич - д.т.н., профессор кафедры “Теплотехника и теплоэнергетика” ТТУ им. акад. М.С. Осими. г. Душанбе, **Раджабова Саехат Сайфуллоевна** – соискатель кафедры “Общая физика” ТГПУ имени С. Айни, г. Душанбе, **Тиллоева Тахмина Рустамовна** – зав. заочным отделением Филиала МЭИ в г. Душанбе, **Зарипова Мохира Абдусаломовна** - д.т.н., профессор кафедры “Теплотехника и теплоэнергетика” ТТУ им. акад. М.С. Осими. г. Душанбе.

Makhmadali Makhmadievich Safarov - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of "Heat Engineering and Heat Power Engineering" of M.S. Akad. Osimi. Dushanbe, **Rajabova Saehat Saifulloevna** - Candidate of the Department of "General Physics" of S. Aini TSPU, Dushanbe, **Tilloeva Tahmina Rustamovna** - head. by correspondence department of the Branch of the MEI in Dushanbe, **Zaripova Mokhira Abdusalomovna** - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of "Heat Engineering and Heat Power Engineering" of the TTU named after M.S. Osimi. The city of Dushanbe.

Влияние кремниевых фуллеренов на изменение термодинамических характеристик электролитов NaCl в зависимости от температуры при атмосферном давлении

Influence of silicon fullerenes on changes in thermodynamic characteristics of NaCl electrolytes depending on temperature at atmospheric pressure

Ключевые слова: электролит, теплоемкость, концентрация, кремниевые нанотрубки (кремниевые фуллерены).

Key words: electrolyte, heat capacity, concentration, silicon nanotubes (silicon fullerenes).

Аннотация: В статье приводятся результаты экспериментального исследования теплоемкости, энтальпии, энтропии, энергии Гиббса и энергии Гельмгольца электролитов NaCl в зависимости от температуры при

атмосферном давлении. Результаты исследования показали, что добавки кремниевых нанотрубок повышают теплоемкость электролитов NaCl. Общая относительная погрешность измерения теплоемкости составляет 3,2% при доверительной вероятности 0,95. На основе данных по теплоемкости наножидкостей системы электролитов NaCl и кремниевых нанотрубок получены эмпирические уравнения.

Abstract: The article presents the results of an experimental study of the heat capacity, enthalpy, entropy, energy Gibbs, energy Gelmgols e.t. of NaCl electrolytes depending on temperature at atmospheric pressure. The research results showed that silicon nanotube additives increase the heat capacity of NaCl electrolytes. The overall relative error in measuring the heat capacity is 3.2% with a confidence level of 0,95. Based on data on the heat capacity of nanofluids of the NaCl electrolyte system. and silicon nanotubes, empirical equations are obtained.

Наноструктуры на основе кремния и диоксида кремния, нанопорошок, нанотрубки, кремниевые фуллерены и нанонити, нанокompозиты имеют перспективу широкого применения в нанoeлектронике, оптоэлектронике, солнечной энергетике и нанотеплофизике.

Объекты исследования.

Кремниевые фуллерены. В промышленности и технологиях достаточно часто применяется кремний. Кремний и его производные являются важными материалами для промышленности, например, в полупроводниках, оптоэлектронике и телекоммуникации. Линейные размеры наноалмазов колеблются от 10нм до 50нм. Диаметр углеродных нано-трубок колеблется от 4 нм до 20нм, а их длина от 100нм до 2 мкм [1].

Водные растворы NaCl: №1-(H₂O+5%NaCl); №2-(H₂O+10%NaCl); №3-(H₂O + 12,5% NaCl); №4-(H₂O+15%NaCl); №5-(H₂O+24,26%NaCl) [2].

Литературные данные по теплоемкости водных растворов NaCl при различных температурах (288-323) К и массовой концентрации NaCl приводятся в работе (табл. 1) [2].

Таблица 1. Удельная изобарная теплоемкость (C_p , Дж/(кг.К)) водных растворов NaCl в зависимости от температуры и атмосферного давления [3].

Т,К	№1	№2	№3	№4	№5
288	3987,7	3853,8	3665,8	3519,6	3272,9
293	3975,2	3845,6	3657,5	3515,4	3272,9
313	3925,0	3799,6	3632,4	3494,5	3264,2
333	3882,2	3753,6	3603,2	3469,4	3239,5
353	3847,2	3699,3	3578,1	3415,1	3206,1
373	3791,3	3644,9	-	3314,7	3172,6

Объекты исследования: №1-($H_2O+5\%NaCl$); №2-($H_2O+10\%NaCl$); №3-($H_2O+12,5\%NaCl$); №4- ($H_2O+15\%NaCl$); №5-($H_2O+24,26\%NaCl$).

Таблица 2. Удельная изобарная теплоемкость (C_p , Дж/(кг.К)) водных растворов NaCl ($H_2O + 5\%NaCl$) в зависимости от температуры, концентрации фуллерена (Si) и атмосферного давления (0,101) МПа.

Образец Т,К	№1[3]	№2	№3	№4	№5	№6
288,2	3987,7	4032,6	4077,8	4122,3	4167,3	4210,6
293,6	3975,2	4020,5	4064,4	4110,6	4155,3	4201,9
313,2	3925,0	3969,4	4014,5	4055,4	4104,4	4149,3
333,6	3883,2	3928,1	3973,2	4018,3	4063,5	4108,4
353,4	3837,2	3882,8	3927,1	3972,3	4017,7	4062,6
373,4	3791,3	3836,4	3881,2	3926,3	3971,4	4016,2
393,0	-	3790,0	3835,6	3880,2	3925,5	3969,4
413,5	-	3744,3	3789,1	3834,3	3879,4	3923,6
423,4	-	3698,3	3743,3	3788,4	3833,5	3878,3
433,2	-	3652,4	3697,6	3742,6	3787,0	3831,4

Объекты исследования: №1-($H_2O+5\%NaCl+0,5\%Si$ (фуллерен)); №2-($H_2O+5\%NaCl+1,0\%Si$ (фуллерен)); №3-($H_2O+5\%NaCl+1,5\%Si$ (фуллерен)); №4-($H_2O+5\%NaCl+2,0\%Si$ (фуллерен)); №5 -($H_2O+5\% NaCl+2,5\%Si$ (фуллерен)); №6-($H_2O+5\% NaCl+3,0\%Si$ (фуллерен)).

Результаты исследования теплоемкости водных растворов NaCl в зависимости от температуры при атмосферном давлении авторами [2] и наши измерения по теплоемкости исследуемых растворов и внедренным в них наноразмерных кремниевых фуллеренов приведены в таблицах 2-6.

Таблица 3. Удельная изобарная теплоемкость (C_p , Дж/(кг.К)) водных растворов NaCl ($H_2O + 10\%NaCl$) в зависимости от температуры, концентрации фуллерена (Si) и атмосферного давления (0,101) МПа.

Образец Т,К	№1 [3]	№2	№3	№4	№5	№6
288,2	3853,8	3903,6	3953,8	4003,6	4053,6	4103,5
293,6	3845,6	3895,4	3945,5	3955,7	4005,5	4055,6
313,2	3799,5	3849,9	3899,5	3949,6	3999,6	4049,5
333,6	3753,6	3803,4	3853,6	3858,4	3908,5	3958,7
353,4	3699,3	3749,8	3799,4	3849,3	3897,3	3947,8
373,4	3644,9	3694,4	3744,2	3794,3	3844,4	3894,5
393,0	-	3639,2	3689,6	3739,3	3786,5	3836,5
413,5	-	3584,3	3634,1	3684,3	3734,8	3793,3
423,4	-	3529,5	3579,3	3629,4	3679,5	3729,6
433,2	-	3474,6	3524,6	3574,6	3624,0	3674,5

Объекты исследования: №1-($H_2O + 10\%NaCl + 0,5\%Si$ (фуллерен)); №2-($H_2O + 10\%NaCl + 1,0\%Si$ (фуллерен)); №3-($H_2O + 10\%NaCl + 1,5\%Si$ (фуллерен)); №4-($H_2O + 10\%NaCl + 2,0\%Si$ (фуллерен)); №5-($H_2O + 10\%NaCl + 2,5\%Si$ (фуллерен)); №6-($H_2O + 10\%NaCl + 3,0\%Si$ (фуллерен)).

Таблица 4. Удельная изобарная теплоемкость (C_p , Дж/(кг.К)) водных растворов NaCl ($H_2O + 12,5\%NaCl$) в зависимости от температуры, концентрации фуллерена (Si) и атмосферного давления (0,101) МПа.

Образец Т,К	№1 [3]	№2	№3	№4	№5	№6
288,2	3665,9	3720,6	3775,8	3830,6	3885,6	3940,0
293,6	3657,5	3712,4	3757,5	3812,7	3867,5	3922,1
313,2	3632,4	3687,9	3742,5	3797,6	3852,6	3907,3
333,6	3603,2	3658,4	3713,6	3768,4	3823,5	3878,2

353,4	3578,1	3633,7	3688,2	3743,3	3798,2	3853,4
373,4	-	3606,4	3661,2	3716,3	3772,4	3827,6
393,0	-	3583,2	3638,6	3693,3	3748,5	3803,8
413,5	-	3551,3	3606,1	3661,3	3716,8	3771,5
423,4	-	3519,5	3574,3	3629,4	3684,5	3739,7
433,2	-	3494,6	3549,6	3604,6	3659,0	3714,6

Объекты исследования: № 1 - ($H_2O+12,5\%NaCl+0,5\%Si$ (фуллерен)); № 2 - ($H_2O+12,5\% NaCl +1,0\%Si$ (фуллерен)); № 3 - ($H_2O+12,5\%NaCl+1,5\%Si$ (фуллерен)); № 4 - ($H_2O+12,5\%NaCl+2,0\%Si$ (фуллерен)); № 5 - ($H_2O+12,5\%NaCl+2,5\%Si$ (фуллерен)); № 6 - ($H_2O+12,5\%NaCl+3,0\%Si$ (фуллерен)).

Таблица 5. Удельная изобарная теплоемкость (C_p , Дж/(кг.К)) водных растворов NaCl ($H_2O+ 15,0\%NaCl$) в зависимости от температуры, концентрации фуллерена (Si) и атмосферного давления (0,101) МПа.

Образец T, К	№1 [3]	№2	№3	№4	№5	№6
288,2	3519,6	3569,6	3619,8	3669,6	3719,6	3769,6
293,6	3515,4	3565,4	3615,5	3665,7	3715,5	3765,8
313,2	3494,5	3544,9	3594,5	3644,6	3694,6	3744,5
333,6	3469,4	3519,4	3569,6	3619,4	3669,5	3719,3
353,4	3415,1	3465,8	3515,3	3565,3	3615,6	3665,6
373,4	3314,7	3364,4	3414,2	3464,3	3514,4	3564,8
393,0	-	3265,2	3315,6	3365,3	3415,5	3465,7
413,5	-	3156,3	3206,1	3256,3	3306,8	3356,4
423,4	-	3057,5	3107,3	3157,4	3207,5	3257,6
433,2	-	2957,6	3007,6	3057,6	3107,0	3157,2

Объекты исследования: №1- ($H_2O+15\%NaCl+0,5\%Si$ (фуллерен)); №2- ($H_2O+15\%NaCl+1,0\% Si$ (фуллерен)); №3- ($H_2O+15\%NaCl+1,5\%Si$ (фуллерен)); №4- ($H_2O+15\%NaCl+2,0\%Si$ (фуллерен)); №5- ($H_2O+15\% NaCl+2,5\%Si$ (фуллерен)); №6 - ($H_2O+15\% NaCl+3,0\%Si$ (фуллерен)).

Таблица 6. Удельная изобарная теплоемкость (C_p , Дж/(кг.К)) водных растворов NaCl ($H_2O + 24,26\%NaCl$) в зависимости от температуры, концентрации фуллерена (Si) и атмосферного давления (0,101) МПа.

Образец Т,К	№1 [3]	№2	№3	№4	№5	№6
288,2	3272,9	3337,6	3402,8	3467,6	3532,6	3597,5
293,6	3272,9	3337,4	3402,5	3467,7	3568,5	3597,6
313,2	3264,6	3329,9	3394,5	3459,6	3525,6	3590,5
333,6	3239,5	3304,4	3369,6	3434,4	3499,5	3564,7
353,4	3206,1	3271,8	3336,4	3402,3	3467,5	3532,8
373,4	3172,6	3237,4	3302,2	3367,3	3432,4	3497,5
393,0	-	3204,2	3269,6	3334,3	3399,5	3464,5
413,5	-	3170,3	3235,1	3300,3	3365,8	3430,3
423,4	-	3136,5	3201,3	3266,4	3331,5	3396,6
433,2	-	3102,6	3167,6	3232,6	3297,0	3362,5

Объекты исследования: №1-($H_2O + 24,26\%NaCl + 0,5\%Si$ (фуллерен)); №2-($H_2O + 24,26\%NaCl + 1,0\%Si$ (фуллерен)); №3-($H_2O + 24,26\%NaCl + 1,5\%Si$ (фуллерен)); №4-($H_2O + 24,26\%NaCl + 2,0\%Si$ (фуллерен)); №5-($H_2O + 24,26\%NaCl + 2,5\%Si$ (фуллерен)); №6-($H_2O + 24,26\%NaCl + 3,0\%Si$ (фуллерен)).

Результаты измерения теплоемкости водных растворов и наночастиц кремниевых фуллеренов показали (табл. 2-6), что теплоемкость исследуемых растворов при атмосферном давлении зависит от концентрации наполнителя, их фракции и температуры. С повышением температуры (288-433)К теплоемкость растворов, в то же время электролит NaCl уменьшаются по линейному закону. Добавки наночастиц повышают теплоемкость исследуемых растворов. На основе данных по теплоемкости растворов получены эмпирические уравнения.

Для обработки экспериментального значения теплоемкости системы водный раствор NaCl и его коллоидные растворы с кремниевыми фуллеренами от температуры при атмосферном давлении использовали следующие выражения:

$$\frac{C_{p,T}}{C_{p,T}^*} = f\left(\frac{T}{T_1}\right), \quad (1)$$

где C_p - теплоемкость соответственно исследуемых образцов при различных температурах и давлениях $C_{p,T}^*$ - значения теплоемкости при температурах T и T_1 ; $T_1=353\text{K}$. Выполнимость выражения (1) показана на рис.1.

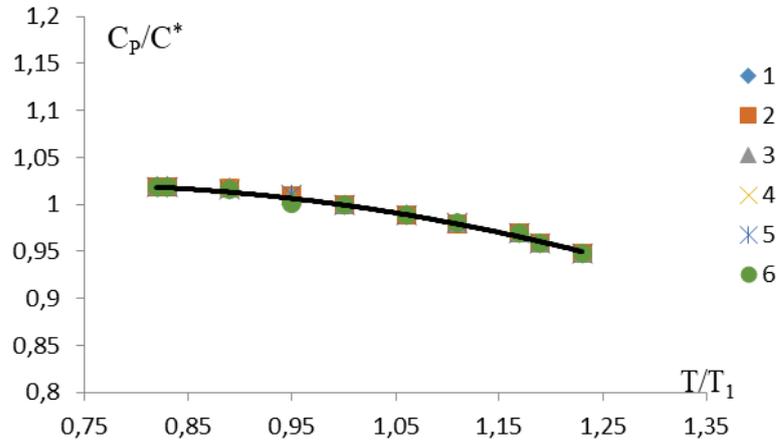


Рис. 1. Зависимость относительной теплоемкости от относительной температуры при атмосферном давлении.

Уравнение кривой линии, приведенной на рисунке 1, имеет вид:

$$C_p/C^* = -0,2671(T/T_1)^2 + 0,3802(T/T_1) + 0,8861 \quad (2)$$

Анализ значения (C^*) графически представлен на рисунке 2.

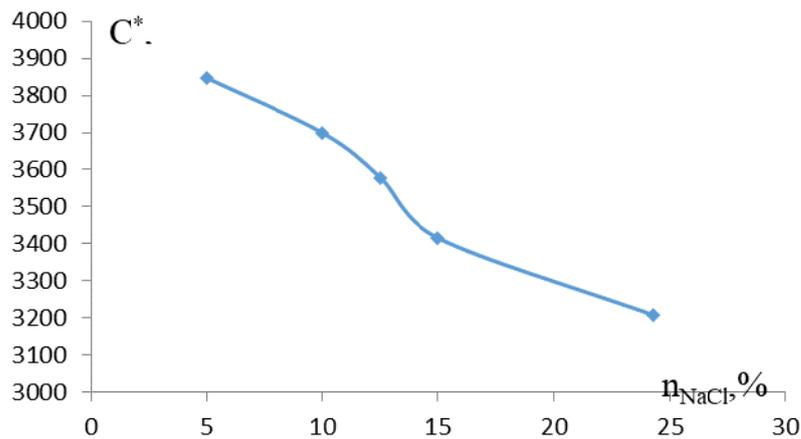


Рис. 2. Зависимость теплоемкости (C^*) от концентрации (NaCl) внедренных в воде (H_2O) при температуре ($T_1=353\text{ K}$) и атмосферном давлении (0,101) МПа.

Уравнение кривой линии, показанной на рисунке 2, имеет вид:

$$C^*=(0,548(n_{NaCl})^2 -50,762(n_{NaCl})+4107), \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}) \quad (3)$$

Далее результаты экспериментального исследования теплоемкости электролитов с внедренными в них кремниевых фуллеренов показали, что добавки в электролите кремни-евых фуллеренов повышают теплоемкость растворов системы (NaCl+H₂O). Полученные данные в виде таблиц приведены ниже (рисунок 3.)

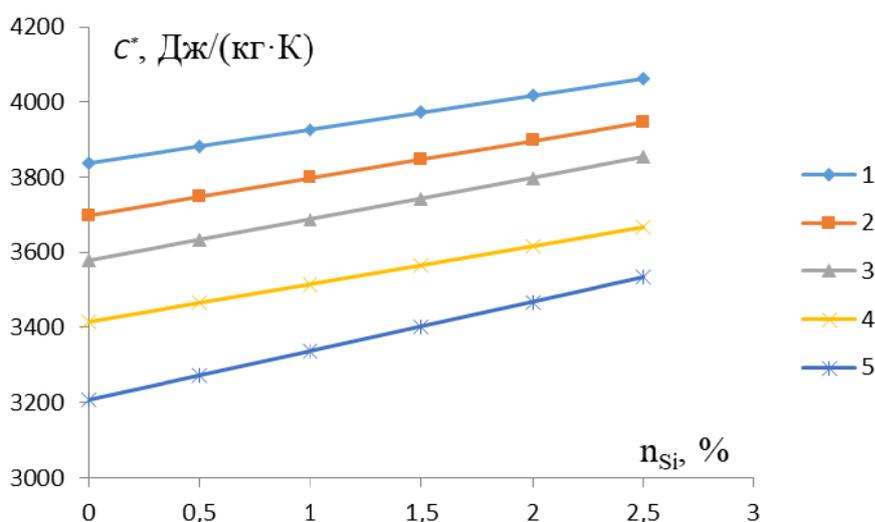


Рис. 3. Зависимость теплоемкости (C^*) от концентрации фуллерена n_{Si} , % внедренных в электролит NaCl при температуре ($T_1=353$ K) и атмосферном давлении (0,101) Мпа: (Образец №1- ($H_2O+5\%NaCl$)+(от 0 до 2,5%Si); Образец №2- ($H_2O +10\%NaCl$)+(от 0 до 2,5%Si); Образец №3- ($H_2O +12,5\%NaCl$)+(от 0 до 2,5%Si); Образец №4- ($H_2O +15\%NaCl$)+(от 0 до 2,5% Si); Образец №5- ($H_2O +24,26\%NaCl$)+(от 0 до 2,5%Si).

Как видно из графика, показанного на рисунке 3, удельная изобарная теплоемкость электролитов с внедренными в них кремниевых фуллеренов с повышением концентрации фуллеренов во всем диапазоне температуры растет на основе закона прямой линии.

Уравнение прямой линии, показанной на рисунке 3, имеет вид:

$$(C^*)= F (n_{Si})+D, \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}) \quad (4)$$

Коэффициенты уравнения (4), F и D приведены в таблице 7.

Таблица 7. Коэффициенты F и D уравнения (4) для исследуемых электролитов при температуре $T_1=353$ К и атмосферном давлении.

№№	Образцы	F, Дж/(кг К%)	D, Дж/(кг К)
1	$(H_2O+5\%NaCl)$ +(от 0 до 2,5%Si)	90,063	3837,3
2	$(H_2O +10\%NaCl)$ +(от 0 до 2,5%Si)	99,166	3699,8
3	$(H_2O +12,5\%NaCl)$ +(от 0 до 2,5%Si)	110,11	3578,3
4	$(H_2O +15\%NaCl)$ +(от 0 до 2,5% Si)	100.14	3415,2
5	$(H_2O +24,26\%NaCl)$ +(от 0 до 2,5%Si)	130.62	3206.2

С помощью уравнения (2), с учетом значений таблицы 7 и выражений (3) и (4), можно численно рассчитать удельную изобарную теплоемкость коллоидных электролитов системы $(NaCl+H_2O)$ при различных температурах, концентрации кремниевых фуллеренов и концентрации воды в атмосферном давлении.

Список литературы

1. **Калеева А.А.**, Тимеркаев Б.А., Шамсутдинов Р.С., Сайфутдинов А.И., Шакиров Б. Р. Микродуговой способ синтеза наноструктур кремния. / 1-ая Всероссийская конференция с международным участием. «Газоразрядная плазма и синтез наноструктур », «КНИТУ-КАИ », Казань, 2020.-С.120-120.
2. **Ковалевская Н.С.** Теплоемкость водных растворов NaCl./Н.С.Ковалевская// Диск.т.н., М.: МЭИ.-1954.-198с.
3. **Справочник по** теплофизическим свойствам газов и жидкостей /Н.Б.Варгафтик, Л.П.Филиппов и др.// Изд-во стандартов, М., 1963. -708с

Удалова А.П., Чернышов В.Н.
Udalova A.P., Chernyshov V.N.

ФГБОУ ВО "Тамбовский государственный технический университет",
г. Тамбов

Tambov State Technical University, Tambov

Удалова Анастасия Петровна – ассистент кафедры «Радиотехника»;
Чернышов Владимир Николаевич – д.т.н., профессор, зав. кафедрой
«Уголовное право и прикладная информатика в юриспруденции».

Udalova Anastasiya Petrovna – assistant of the Department "Radio
Engineering"; **Chernyshov Vladimir Nikolaevich** – doctor of engineering,
Professor, Head of the Department "Criminal Law and Applied Computer Sciences
in Law".

**Метод неразрушающего контроля теплофизических характеристик
материалов и изделий с использованием СВЧ-нагрева и его
метрологический анализ**

**Non-destructive testing method of thermophysical characteristics of
materials and products using microwave heating and its metrological analysis**

Ключевые слова: метрологический анализ; микроволновый нагрев;
неразрушающий контроль; температуропроводность; теплопроводность.

Аннотация: Рассмотрен метод неразрушающего контроля
теплофизических характеристик материалов и изделий и проведен
метрологический анализ представленного метода.

Key words: metrological analysis; microwave heating; unbrakable control;
thermal diffusivity; thermal conductivity.

Abstract: The method of non-destructive testing of thermophysical
characteristics of materials and products is considered and a metrological analysis
of the presented method is carried out.

Наиболее перспективным направлением развития бесконтактных методов
неразрушающего контроля теплофизических характеристик (ТФХ)
материалов являются методы, основанные на нагреве исследуемых
материалов электромагнитной энергией СВЧ-диапазона. Они не требуют
разрушения готовых изделий и могут быть использованы в реальных
условиях эксплуатации исследуемых конструкций.

Предложенный в данной работе [1] метод заключается в нагреве исследуемого материала импульсами микроволнового излучения, сфокусированными в линию на поверхности исследуемого объекта. На заданном расстоянии от линии нагрева находится точка контроля температуры x_1 . Количество импульсов n_1 и n_2 и частота их следования F_{x1} и F_{x2} задаются адаптивно таким образом, чтобы температура в точке контроля последовательно достигла двух наперед заданных значений $T_{зад1}$ и $T_{зад2}$. Имея информацию о мощности микроволнового излучения Q , значениях контролируемых температур, количестве импульсов и частоте их следования, по полученным соотношениям рассчитывают искомые ТФХ (коэффициенты температуропроводности и теплопроводности)

$$a = \frac{x_1^2}{4} \frac{T_{зад1} F_{x2}^2 \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{i^2} - T_{зад2} F_{x1}^2 \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i^2}}{T_{зад1} F_{x2} \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{i} - T_{зад2} F_{x1} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i}}; \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{Q F_{x1}}{2\pi T_{зад1}} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i} \exp\left(-\frac{x_1^2 F_{x1}}{4ai}\right). \quad (2)$$

Метрологический анализ погрешностей и их характеристик реализован на основе предложенного подхода, описанного в работе [2], заключающийся в разложении полной погрешности на компоненты и выделении доминирующих компонент. В целях упрощения математических выражений из рассмотрения суммарной погрешности искомых ТФХ исключены погрешности округления результатов числовых измерительных преобразований.

В соответствии с выражением (1) полная погрешность определения температуропроводности Δa зависит от точности установления x_1 , $T_{зад1}$, $T_{зад2}$, F_{x1} , F_{x2} , n_1 , n_2 . Следовательно,

$$\Delta a = \Delta_{x_1} a + \Delta_{T_{зад1}} a + \Delta_{T_{зад2}} a + \Delta_{F_{x1}} a + \Delta_{F_{x2}} a, \quad (3)$$

где $\Delta_{x_1} a$ – погрешность, обусловленная отличием x_1 от истинного

значения $x_1^{ист}$, т.е. $x_1 = x_1^{ист} + \Delta x_1$; $\Delta_{T_{зад1}} a$ – погрешность, обусловленная отличием $T_{зад1}$ от истинного значения $T_{зад1}^{ист}$, т.е. $T_{зад1} = T_{зад1}^{ист} + \Delta T_{зад1}$; $\Delta_{T_{зад2}} a$ – погрешность, обусловленная отличием $T_{зад2}$ от истинного значения $T_{зад2}^{ист}$, т.е. $T_{зад2} = T_{зад2}^{ист} + \Delta T_{зад2}$; $\Delta_{F_{x1}} a$ – погрешность, обусловленная отличием F_{x1} от истинного значения $F_{x1}^{ист}$, т.е. $F_{x1} = F_{x1}^{ист} + \Delta F_{x1}$; $\Delta_{F_{x2}} a$ – погрешность, обусловленная отличием F_{x2} от истинного значения $F_{x2}^{ист}$, т.е. $F_{x2} = F_{x2}^{ист} + \Delta F_{x2}$.

В соответствии с выражением (2) полная погрешность определения температуропроводности $\Delta\lambda$ зависит от точности установления Q , x_1 , F_{x1} , $T_{зад1}$, a , n_1 . Следовательно,

$$\Delta\lambda = \Delta_Q \lambda + \Delta_{x_1} \lambda + \Delta_{F_{x1}} \lambda + \Delta_{T_{зад1}} \lambda + \Delta_a \lambda, \quad (4)$$

где $\Delta_Q a$ – погрешность, обусловленная отличием Q от истинного значения $Q^{ист}$, т.е. $Q = Q^{ист} + \Delta Q$; $\Delta_{x_1} a$ – погрешность, обусловленная отличием x_1 от истинного значения $x_1^{ист}$, т.е. $x_1 = x_1^{ист} + \Delta x_1$; $\Delta_{F_{x1}} \lambda$ – погрешность, обусловленная отличием F_{x1} от истинного значения $F_{x1}^{ист}$, т.е. $F_{x1} = F_{x1}^{ист} + \Delta F_{x1}$; $\Delta_{T_{зад1}} \lambda$ – погрешность, обусловленная отличием $T_{зад1}$ от истинного значения $T_{зад1}^{ист}$, т.е. $T_{зад1} = T_{зад1}^{ист} + \Delta T_{зад1}$; $\Delta_a \lambda$ – погрешность, обусловленная отличием a от истинного значения $a^{ист}$, т.е. $a = a^{ист} + \Delta a$.

Результаты выделения доминант представлены в таблице 1. Отклонение каждого параметра $\pm 10\%$ при постоянстве остальных.

Таблица 1. Результаты выделения доминант общей погрешности.

Параметр		x_1	$T_{зад1}$	$T_{зад2}$	F_{x1}	F_{x2}	Q	a ,
Макс.	$\Delta a, \%$	20,97	72,88	66,65	40,35	12,43	–	–
отклонение	$\Delta\lambda, \%$	0,0021	11,11	–	9,93	–	10	63,68

Анализ полученных данных показал, что при определении ТФХ наружных слоев из пяти компонент a доминируют $T_{зад1}$ и $T_{зад2}$, далее следуют F_{x1} , x_1 , и F_{x2} . При определении теплопроводности внутреннего слоя доминирует a , далее следуют $T_{зад1}$, Q и F_{x1} . Параметр x_1 вносит незначительную погрешность в результаты определения теплопроводности.

Предложенный метод позволяет осуществлять контроль теплофизических характеристик материалов и изделий с сохранением целостности исследуемой конструкции в реальных условиях эксплуатации за счет адаптивного нагрева исследуемого материала энергией микроволнового диапазона до заранее заданной температуры, меньшей температуры термодеструкции исследуемого материала. Прогрев высоких по уровню температур позволяет прогреть большой объем материала и получить интегральную и усредненную по объему контролируемую температуру, что повышает точность описанного метода. Также на основе метрологического анализа рекомендовано обеспечивать условия для более точного определения доминирующих параметров общей погрешности при проведении теплофизических экспериментов, что позволит уменьшить общую составляющую погрешности и повысить точность предложенного метода.

Список литературы

1. **Мордасов С.А.** СВЧ-нагрев в системе неразрушающего контроля теплофизических характеристик строительных материалов и изделий / С.А. Мордасов, А.П. Негуляева, В.Н. Чернышов // Контроль. Диагностика. – 2020, № 1. – С. 38 – 43.
2. **Чернышов А.В.** Анализ погрешностей бесконтактного метода неразрушающего контроля ТФХ материалов / А.В. Чернышов // Труды ТГТУ: сб. науч. Ст. молодых ученых и студентов. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2004.- Вып. 16. – С. 63 – 67.

УДК.681.5.017:536.2.083

Удалова А.П., Чернышов А.В.
Udalova A.P., Chernyshov A.V.

ФГБОУ ВО "Тамбовский государственный технический университет",
г. Тамбов

Tambov State Technical University, Tambov

Удалова Анастасия Петровна – ассистент кафедры «Радиотехника»;
Чернышов Алексей Владимирович – к.т.н., доцент кафедры «Уголовное право и прикладная информатика в юриспруденции».

Udalova Anastasiya Petrovna – assistant of the Department "Radio Engineering";
Chernyshov Aleksei Vladimirovich – candidate of technical Sciences, docent of the Department "Criminal Law and Applied Computer Sciences in Law".

Неразрушающий микроволновый метод контроля теплофизических характеристик многослойных конструкций с метрологическим анализом

Non-destructive microwave method for monitoring thermophysical characteristics of multilayer structures with metrological analysis

Ключевые слова: метрологический анализ; микроволновый нагрев; неразрушающий контроль; температуропроводность; теплопроводность.

Аннотация: Представлен неразрушающий метод контроля теплофизических характеристик многослойных конструкций и проведен метрологический анализ предложенного метода.

Key words: metrological analysis; microwave heating; unbrakable control; thermal diffusivity; thermal conductivity.

Abstract: Presented a non-destructive method for monitoring the thermophysical characteristics of multilayer structures and carried out a metrological analysis of the proposed method.

Методы контроля теплофизических характеристик (ТФХ) материалов и изделий, в которых тепловое воздействие осуществляется бесконтактно с использованием энергии микроволнового излучения, позволяют определять искомые ТФХ материалов без вывода готовых изделий из эксплуатации и позволяют сохранить целостность конструкций.

Рассматриваемый метод [1] заключается в нагреве наружных слоев исследуемой трехслойной конструкции электромагнитной энергией СВЧ-

диапазона с заданной частотой f в течение заданного времени. Контроль температур осуществляется в двух точках на расстояниях x_1 и x_2 от линии нагрева в заданный момент времени τ^* . Имея информацию о мощности излучения Q и значениях избыточных температур $T(x_1, \tau^*)$ и $T(x_2, \tau^*)$ и по полученным формулам определяют температуропроводность a и теплопроводность λ каждого наружного слоя [1]

$$a = \frac{x_2^2 - x_1^2}{4 \cdot \tau^* \cdot \ln \left(\frac{T(x_1, \tau^*)}{T(x_2, \tau^*)} \right)}; \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{Q}{2T(x_1, \tau^*)} \sqrt{\frac{a}{\pi \tau^*}} \exp \left(-\frac{x_1^2}{4a\tau^*} \right). \quad (2)$$

Для определения ТФХ материала внутреннего слоя исследуемой конструкции микроволновой нагрев осуществляют излучением заданной частоты через круговую область до тех пор, пока на противоположной поверхности конструкции появится тепловой поток, при этом измеряют величину теплового потока q_x . Имея информацию о величине теплового потока q_x , толщине наружных слоев R_1 , R_3 и толщине внутреннего слоя R_2 , ТФХ наружных слоев λ_1 и λ_3 по известным соотношениям определяют температуры T_1 , T_2 , T_3 , T_4 в плоскостях. Затем по полученному соотношению определяют теплопроводность λ_2 внутреннего слоя [1]

$$\lambda_2 = \frac{q_x R_2}{(T_2 - T_3)}. \quad (3)$$

Метрологический анализ погрешностей и их характеристик реализован на основе предложенного подхода, заключающегося в разложении полной погрешности на компоненты и выделении доминирующих компонент. В соответствии с выражением (1) полная погрешность определения температуропроводности Δa зависит от точности установления x_1 , x_2 , τ^* , $T(x_1, \tau^*)$, $T(x_2, \tau^*)$. Следовательно,

$$\Delta a = \Delta_{x_1} a + \Delta_{x_2} a + \Delta_{\tau^*} a + \Delta_{T(x_1, \tau^*)} a + \Delta_{T(x_2, \tau^*)} a, \quad (5)$$

где $\Delta_{x_1} a$ – погрешность, обусловленная отличием x_1 от истинного значения $x_1^{ист}$, т.е. $x_1 = x_1^{ист} + \Delta x_1$; $\Delta_{x_2} a$ – погрешность, обусловленная отличием x_2 от истинного значения $x_2^{ист}$, т.е. $x_2 = x_2^{ист} + \Delta x_2$; $\Delta_{\tau^*} a$ – погрешность, обусловленная отличием τ^* от истинного значения $\tau^{*ист}$, т.е. $\tau^* = \tau^{*ист} + \Delta \tau^*$;

$\Delta_{T(x_1, \tau^*)} a$ – погрешность, обусловленная отличием $T(x_1, \tau^*)$ от истинного значения $T(x_1, \tau^*)^{ист}$, т.е. $T(x_1, \tau^*) = T(x_1, \tau^*)^{ист} + \Delta T(x_1, \tau^*)$;

$\Delta_{T(x_2, \tau^*)} a$ – погрешность, обусловленная отличием $T(x_2, \tau^*)$ от истинного значения $T(x_2, \tau^*)^{ист}$, т.е. $T(x_2, \tau^*) = T(x_2, \tau^*)^{ист} + \Delta T(x_2, \tau^*)$;

В соответствии с выражением (2) полная погрешность определения теплопроводности $\Delta \lambda$ зависит от точности установления $x_1, \tau^*, T(x_1, \tau^*), Q, a$. Следовательно,

$$\Delta \lambda = \Delta_{x_1} \lambda + \Delta_{\tau^*} \lambda + \Delta_{T(x_1, \tau^*)} \lambda + \Delta_Q \lambda + \Delta_a \lambda, \quad (6)$$

где $\Delta_{x_1} \lambda$ – погрешность, обусловленная отличием x_1 от истинного значения $x_1^{ист}$, т.е. $x_1 = x_1^{ист} + \Delta x_1$; $\Delta_{\tau^*} \lambda$ – погрешность, обусловленная отличием τ^* от истинного значения $\tau^{*ист}$, т.е. $\tau^* = \tau^{*ист} + \Delta \tau^*$; $\Delta_{T(x_1, \tau^*)} \lambda$ – погрешность, обусловленная отличием $T(x_1, \tau^*)$ от истинного значения $T(x_1, \tau^*)^{ист}$, т.е. $T(x_1, \tau^*) = T(x_1, \tau^*)^{ист} + \Delta T(x_1, \tau^*)$; $\Delta_Q \lambda$ – погрешность, обусловленная отличием Q от истинного значения $Q^{ист}$, т.е. $Q = Q^{ист} + \Delta Q$; $\Delta_a \lambda$ – погрешность, обусловленная отличием a от истинного значения $a^{ист}$, т.е. $a = a^{ист} + \Delta a$.

В соответствии с выражением (3) полная погрешность определения теплопроводности $\Delta \lambda$ зависит от точности установления q_x, R_2, T_2, T_3 . Следовательно,

$$\Delta\lambda = \Delta_{q_x} \lambda + \Delta_{R_2} \lambda + \Delta_{T_2} \lambda + \Delta_{T_3} \lambda, \quad (7)$$

где $\Delta_{q_x} \lambda$ – погрешность, обусловленная отличием q_x от истинного значения $q_x^{ист}$, т.е. $q_x = q_x^{ист} + \Delta q_x$; $\Delta_{R_2} \lambda$ – погрешность, обусловленная отличием R_2 от истинного значения $R_2^{ист}$, т.е. $R_2 = R_2^{ист} + \Delta R_2$; $\Delta_{T_2} \lambda$ – погрешность, обусловленная отличием T_2 от истинного значения $T_2^{ист}$, т.е. $T_2 = T_2^{ист} + \Delta T_2$; $\Delta_{T_3} \lambda$ – погрешность, обусловленная отличием T_3 от истинного значения $T_3^{ист}$, т.е. $T_3 = T_3^{ист} + \Delta T_3$.

Результаты выделения доминант представлены в таблице 1. Отклонение каждого параметра $\pm 10\%$ при постоянстве остальных.

Таблица 1. Результаты выделения доминант общей погрешности.

Наружный слой								
Параметр		x_1	x_2	τ^*	$T(x_1, \tau^*)$	$T(x_2, \tau^*)$	Q	a
Макс. отклонение	$\Delta a, \%$	19.04	25	11.11	128	103.3	–	–
	$\Delta \lambda, \%$	0.0021	–	4.99	11.11	–	10	47.4
Внутренний слой								
Параметр		q_x	R_2	T_2		T_3		
Макс. отклонение	$\Delta \lambda, \%$	10	10	21.29		8.69		

Анализ полученных данных показал, что при определении ТФХ наружных слоев из пяти компонент a доминируют $T(x_1, \tau^*)$ и $T(x_2, \tau^*)$, из пяти компонент λ доминирует a , далее следуют $T(x_1, \tau^*)$ и Q . При определении теплопроводности внутреннего слоя доминирует T_2 , далее следуют q_x , R_2 и T_3 . На основании анализа рекомендовано при проведении теплофизических экспериментов обеспечивать условия для более точного определения доминирующих параметров.

Список литературы

1. **Пат.** № 2744606 РФ, МПК G 01 N 25/18. Микроволновый способ определения теплофизических характеристик многослойных конструкций и изделий / С.А. Мордасов, А.П. Негуляева, В.Н. Чернышов. № 2020124454/28; заявл. 23.07.2020; опубл. 11.03.2021, Бюл. № 8. – 18 с.
2. **Козлов В.П.** Двумерные осесимметричные нестационарные задачи теплопроводности / под ред. А.Г. Шашкова. – Мн.: Наука и техника, 1986. – 392 с.

Мазбут Махмудович Холиков¹, Махмадали Махмадиевич Сафаров²
Mazbut Mahmudovich Kholikov¹, Mahmatali Mahmadiyevich Safarov²

¹Политехнический институт Таджикского технического университета им. акад. М.С. Осими в городе Худжанде; ²Таджикского технического университета им. акад. М.С. Осими в городе Душанбе

¹Polytechnic Institute of the Tajik Technical University named after acad. M.S. Osimi in the city of Khujand.; ²Tajik Technical University named after acad. M.S. Osimi in the city of Dushanbe

Теплофизические свойства пористой гранулированной оксиды алюминия с наполнениями платины, в зависимости от температуры в воздухе

Thermal properties of porous granular aluminum oxide with platinum fillings, depending on the temperature in the air

Ключевые слова: теплоемкость, теплопроводность, оксиды алюминия, платина, теплопроводность, температуропроводность, изобарная теплоемкость, температура.

Аннотация: В данной статье приведены удельная теплоемкость и теплопроводность оксиды алюминия, как в чистом виде, так и содержащей 1% платины интервале температур 298-673 К.

Key words: heat capacity, thermal conductivity, aluminum oxides, platinum, thermal conductivity, thermal diffusivity, isobaric heat capacity, temperature.

Abstract: This article presents the specific heat and thermal conductivity of aluminum oxides, both in pure form and containing 1% platinum in the temperature range of 298-673 K.

На экспериментальных установках, представленных на рисунках 1 - измерены удельная теплоемкость и теплопроводность оксиды алюминия, как в чистом виде, так и содержащей 1% платины интервале температур 298-673 К [1, 2]. На установке ИТС_р-400 использовали для измерения засыпки образцы использовали медный ячеек следующих размеров: диаметр цилиндра d=15 мм и высотой h=10 мм, а для ИТλ-400 - d=15 мм и h=4 мм.

Для того чтобы исследовать теплопроводность и температуропроводность экспериментальным способом относительно зернистых материалов

применили совместно разработанную со своими учениками установку предложенную профессором Сафаровым М.М. (рисунок 1), позволяющую проводить измерения при различных температурах и газах, а также в вакууме [3].

Выбранное устройство для проведения экспериментальных исследований включает приборы электрические, систему для термостатирования, выполненный в виде цилиндра бикалориметр и систему, предназначенную для заполнения. Бикалориметр это устройство, состоящее из двух цилиндров, которые в отношении друг друга расположены коаксиально. Цилиндры представляют собой внутренний и внешний (1). Материал, из которого изготовлены эти цилиндры, является медью. Один из этих цилиндров (внутренний) является ядром, состоящим из трех других цилиндров (измерительный (2) и два компенсационных цилиндры (3) длиной 25 мм). Компенсационные цилиндры способствуют предупреждению потери теплоты измерительным цилиндром сверху и снизу, длина которого составляет 150 мм [3]. Слой испытуемого вещества составлял 6,165 мм. Сверху наружного цилиндра приспособлена пробка (4) с двумя отверстиями, чтобы в одно (6мм) можно было установить трубку (5) для насаждения на нее измерительный и компенсационный цилиндры. Трубка диаметром 4 мм проходит по всей осевой линии до основания установки, где вставляется и приваривается в просверленное отверстие. В нее вставляют маломощный электрический нагреватель и концы горячего спая термопары в фарфоровой саломке [1, 2]. Другое отверстие (10 мм) в пробке (4) служит для установления трубки (6), с помощью которой изучаемым веществом можно было заполнить устройство. Также с помощью этой трубки подается газ и создается вакуум в системе. Пробка (4) в свою очередь приварена к верхнему торцу установки. Для того, чтобы разместить термопары (7, 8), во внешнем цилиндре сделаны отверстия.

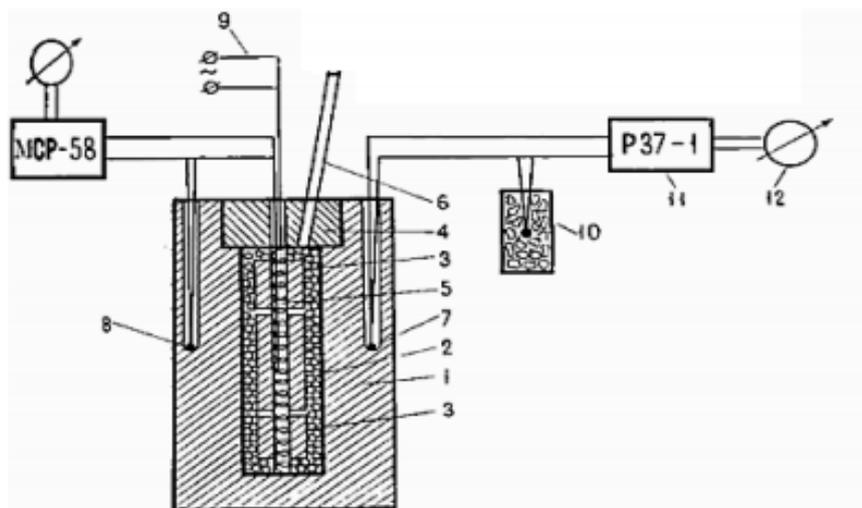


Рис. 1 - Схема устройства для исследования коэффициента теплопроводности сыпучих материалов. 1 - внешний цилиндр; 2 - внутренний цилиндр; 3- компенсационный цилиндр; 4-пробка; 5, 6 - стальная трубка; 7, 8–термопара; 9-маломощный нагреватель; 10–термосстающим льдом; 11- потенциометр; 12- гальванометр.

Измерение температуры проводилось хромельалюмелевыми термопарами, которые подсоединены гальванометру типа М 17/4.

Диапазон температуры, при котором установка позволяет проводить измерения λ зернообразных материалов, составляет 293-893 К.

На установке проведены контрольные измерения, позволяющие оценить достоверность полученных результатов при 293-1073 К [3].

Основными составными элементами опытного устройства являются α -калориметр, система термостатирования, системам вакуума, заполнительная система, датчики электроизмерительные.

α -калориметр по своей сути это цилиндр (1) из меди, выполненный в 190 мм высотой и 100 мм диаметром. Диаметр полостми расточенной в цилиндре равен 30 мм, а глубина полости составила 95,8 мм. Сверху прибор оснащен пробкой (2), имеющей два отверстия. В центральное отверстие размещена с 6мм диаметром металлическая трубка (4) до самого основания, где она и вварена.

К другому отверстию (5) пробки (2), заваренной к корпусу устройства, приваренна трубка (6), которая служит для заполнения измерительной части устройства опытным материалом, газом, а также для создания вакуума. Размеры трубки: диаметр 14x10 мм, длина 400 мм. Спай термопары (9) (горячий) и нагреватель размещаются в трубку (4), а спай (холодный) другой термопары (10) помещается в отверстие корпуса установки. К гальванометру М174 (12) соединены концы термопары. Температура опыта замерялась другой термопарой. Для этого ее горячий (12) спай был установлен в теле устройства, а ее холодный спай помещен в термос со льдом [3, 4].

Потенциометр соединен к гальванометру М 25/2 (16), для фиксирования температуры корпуса α -калориметра, а охлаждающая среда в форме медного цилиндра способствует малому градиенту температуры. Для вакуумирования системы устройство снабжено вакуумным постом ВОУ-1А.

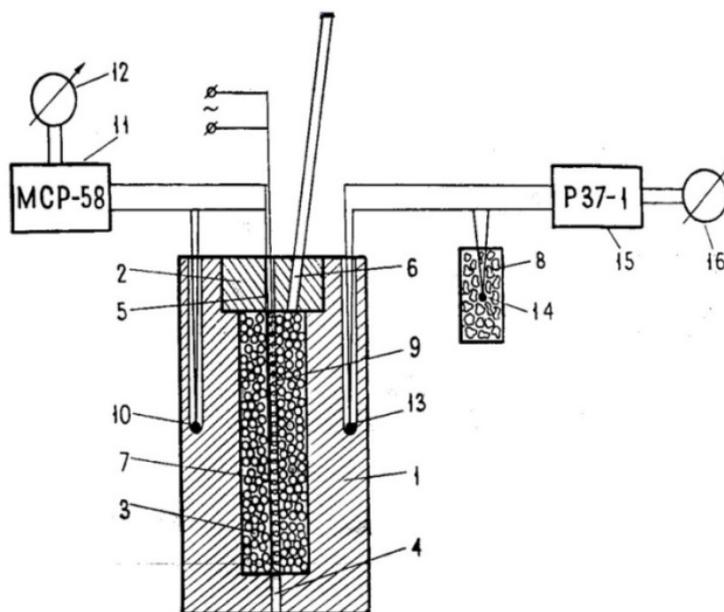


Рис. 2 - Схема измерительного устройства для определения температуропроводности порошков и зернистых материалов: 1 - цилиндр медный; 2-пробка; 3-испытуемый образец; 4,6-трубка металлическая; 7-нагреватель маломощный; 8,9-термопара; 10,13-спай термопары; 14 - сосуд с тающим льдом 15- потенциометр; 16 - гальванометр.

Сперва устройство вакуумируется и проводится измерение, затем перекрывается вентиль (19), а вентили (17,18) переводятся в открытое положение, после чего выполняется заполнение установки газом до требуемого для проведения опыта давления, измеряемое вакуумметром типа ВИТ-2 при 293-1008,6 К.

Результаты измерений удельной теплоемкости и теплопроводности в зависимости от температуры приведены на рисунках 3-5 и таблицах 1-3, согласно которым вышеуказанные величины уменьшаются (за исключением теплоемкости) в зависимости от температуры [5, 6, 7].

Установлено, что с ростом концентрации и температуры у оксид алюминий с наполнением платины увеличиваются коэффициент теплопроводности и удельная изобарная теплоемкость.

Как уже отмечалось в литературном обзоре, ранее экспериментально были исследованы, удельная теплоемкость и теплопроводность, оксид алюминий в зависимости от температуры [6].

Таблица 1 - Удельная изобарная теплоемкость (C_p , Дж/(кг·К)) оксиды алюминия (Al_2O_3) с различными размерами гранул в зависимости от температуры.

T, К	Al_2O_3 (0.8-1.25) мм	Al_2O_3 (2-3) мм	Al_2O_3 (3-4) мм
298	1011	983	1060
323	1028	996	1073
348	1040	1008	1088
373	1054	1019	1100
398	1068	1031	1113
423	1083	1043	1125
448	1095	1052	1138
473	1108	1065	1151
498	1122	1078	1162
523	1135	1087	1176
548	1149	1100	1190
573	1161	1111	1202
598	1175	1122	1217
623	1189	1133	1228
648	1202	1146	1241
673	1215	1157	1253

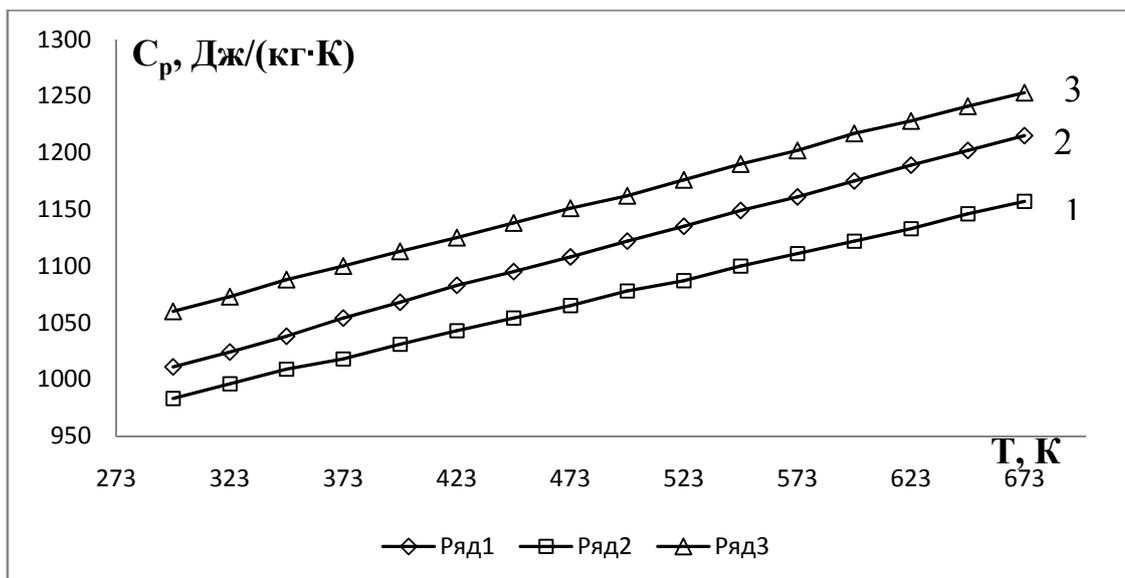


Рис. 3 - Удельная теплоёмкость пористой гранулированной оксиды алюминия с различными размерами гранул в зависимости от температуры: 1 - (2-3) мм, 2 - (0,8-1,25) мм, 3 - (3-4) мм.

Таблица 2 - Удельная изобарная теплоемкость (C_p , Дж/(кг·К)) пористой гранулированной оксиды алюминия содержащей (1%) платина с фракцией (2-3 мм) серией измерения.

T, K	Опыт №1	Опыт №2	Опыт №3
298	1270	1268	1271
323	1291	1291	1292
348	1310	1306	1314
373	1329	1324	1329
398	1349	1344	1348
423	1365	1364	1368

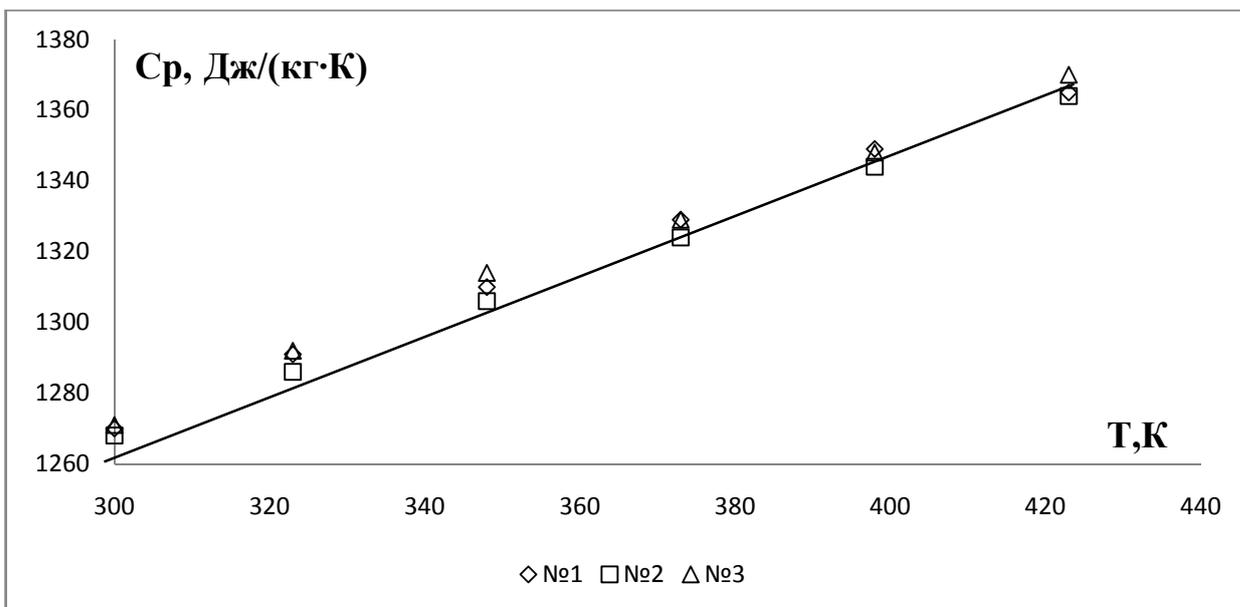


Рис. 4 - Удельная теплоёмкость пористой гранулированной оксиды алюминия с наполнениями платина (1%) в зависимости от температуры в воздухе.

Таблица 3 - Удельная изобарная теплоемкость пористой гранулированной оксиды алюминия содержащей (1%) платина с различными фракциями.

Т,К	2-3 мм	0,8-1,25 мм	3-4 мм
298	1260	1270	1287
323	1280	1290	1307
348	1299	1310	1328
373	1318	1329	1348
398	1339	1349	1369
423	1357	1368	1389

Характер изменения удельная изобарная теплоемкость пористой гранулированной оксиды алюминия с наполнениями платина (1%) в зависимости температуре показан на рисунках 3.3 [8, 9].

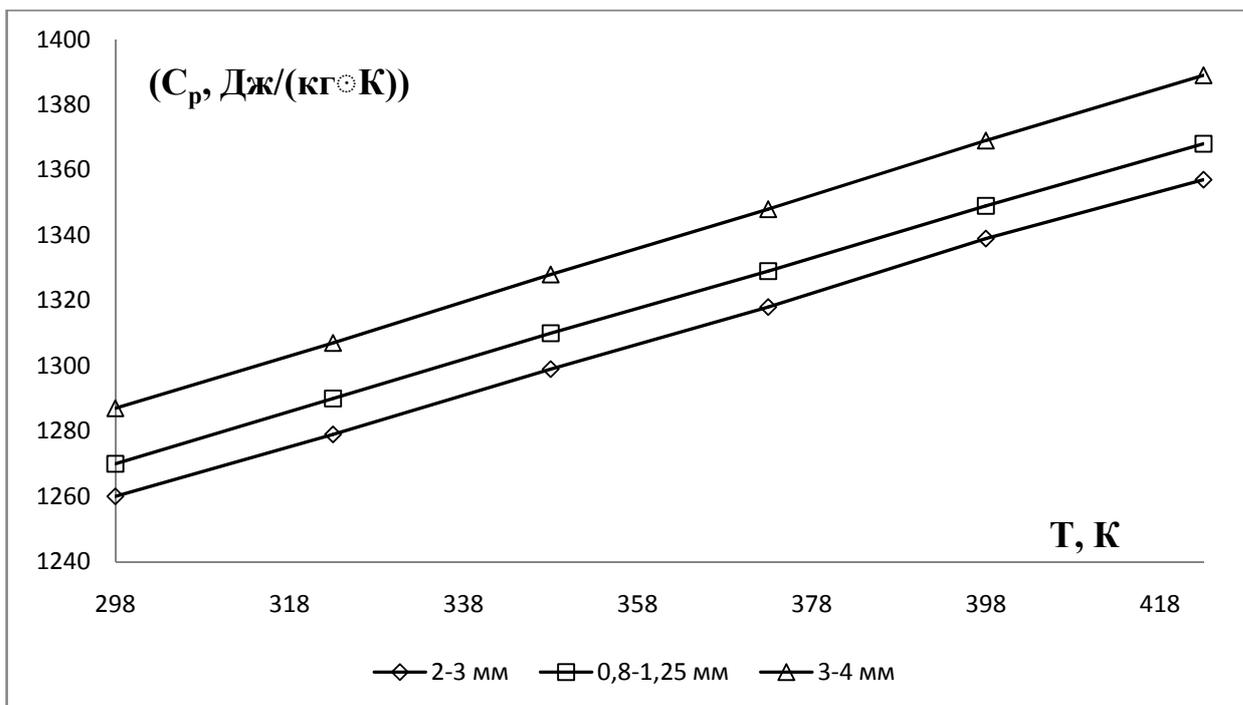


Рис. 5 - Удельная изобарная теплоемкость пористой гранулированной оксиды алюминия содержащей (1%) платина с различными фракциями: 1 - (2-3) мм, 2 - (0,8-1,25) мм, 3 - (3-4) мм.

Установлено что с ростом концентрации и температуры у оксид алюминий с наполнением платины увеличиваются коэффициент теплопроводности и удельная изобарная теплоемкость.

Список литературы

1. **Самиев К.А.** Теплоемкость сплавов алюминия системы Al+Be+Ce / К.А. Самиев, А.М. Сафаров, М.М. Сафаров. // Материалы конференции. XI Российская конференция по теплофизическим свойствам веществ, Санкт-Петербург, 4-7 октября 2005-218 с.
2. **Зарипова М.А.** Применение критерия Нуссельта для обработки экспериментальных данных по теплопроводности теплоносителей. / М.А. Зарипова, Х.А.Зоиров, М.М.Сафаров // Сб. трудов международной конференции «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах» Махачкала, 7-10 сентября 2009. С.64-69.

3. **Мирзомамадов А.Г.** Теплопроводность, температуропроводность, адсорбционные свойства увлажненных медных и никелевых катализаторов на основе пористой гранулированной окиси алюминия. / А.Г. Мирзомамадов, дис.... канд. тех. наук. Душанбе - 2017. 176 с.

4. **Сафаров М.М.,** Самиев К.А. Теплофизические свойства сплавов системы алюминий-бериллий-редкоземельные металлы // М.М. Сафаров, К.А. Самиев Монография, Душанбе, Изд. ООО “Хирад”, 2007, 125 с.

5. **Сафаров М.М.,** Гусейнов К.Д. Теплофизические свойства простых эфиров в широком интервале параметров состояния // М.М.Сафаров, К.Д. Гусейнов Монография - Душанбе, 1996. - 196 с.

6. **Самиев К.А.,** Теплоемкость сплавов алюминия системы Al+Be+Ce/ К.А. Самиев, А.М. Сафаров, М.М. Сафаров, О.Х. Одинаев, И. Н Ганиев // Материалы конференции. XI Российская конференция по теплофизическим свойствам веществ, Санкт-Петербург, 4-7 октября 2005 - 218 с.

7. **Мирзомамадов А.Г.** Адсорбционные свойства катализатора на основе гранулированного оксида алюминия / А.Г. Мирзомамадов, М.М. Сафаров, С.С. Абдуназаров // Сб. тезисов докл. науч. конф. «Актуальные проблемы современной науки» – МиСИС. – С. 79-80.

8. **Сафаров М.М.,** Норов З.Ю., Махмадиев Б.М., Аминов Ш.А., Ризоев С.Г., Сафаров С.К. Определение коэффициента массоотдачи полимера (пентэласт) в процессе увлажнения при различном количестве. Десятая Международная теплофизическая школа, 3-8 октября 2016 г., Таджикистан, “Теплофизические исследования и измерения при контроле качества веществ, материалов и изделий” Душанбе – Тамбов - 2016. С. 355-361.

9. **Завьялова У.Ф.,** Третьяков В.Ф., Бурдейная Т.Н. Блочные Pt (Pd)-Mn-Al-O катализаторы нейтрализации отработанных газов дизельных двигателей. Всероссийская конференция с международным участием. Новосибирск - 2007. - С. 82.

**Карасев П.И., Карамышева Е.О., Катруш А.С.
Karasev P.I., Karamysheva E.O., Katrush A.S.**

МИРЭА - Российский технологический университет
MIREA – Russian technological university

Карасев Павел Игоревич – к.т.н., доцент кафедры КБ-1 РТУ МИРЭА;
Карамышева Екатерина Олеговна – аспирант кафедры КБ-1 РТУ МИРЭА;
Катруш Алексей Сергеевич – студент кафедры КБ-1 РТУ МИРЭА.

Karasev Pavel Igorevich - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the KB-1 Department of RTU MIREA; **Karamysheva Ekaterina Olegovna** - postgraduate student of the KB-1 Department of RTU MIREA; **Aleksey Sergeevich Katrush** - student of the KB-1 Department of RTU MIREA.

К вопросу о синтезе сложных систем управления теплофизическими процессами

Synthesis of complex control systems for thermophysical processes

Ключевые слова: сложная теплофизическая система, синтез, анализ, структура, объект, исследовательский процесс, автоматизация.

Аннотация: В данной статье рассмотрены виды и особенности анализа и синтеза сложных систем управления теплофизическими процессами. Сложные системы управления представляют собой структурированные системы, внутренние элементы которых имеют коммуникационные каналы и определенные схемы взаимодействия.

Key words: complex thermophysical system, synthesis, analysis, structure, object, research process, automation.

Abstract: This article discusses the types and features of the analysis and synthesis of complex control systems for thermophysical processes. Complex control systems are structured systems, the internal elements of which have communication channels and certain interaction schemes.

Под сложными теплофизическими системами понимают составляющие элементы, отдельные составляющие которых, в свою очередь, также можно интерпретировать как сложные. Сложные системы, как правило, имеют значительные уровни вложенности по структурной иерархии, для них свойственна неоднозначность включающихся в их состав подгрупп, существование нелинейных взаимообратных связей, «непрозрачность» внутрисистемного взаимодействия [1].

Сущностью анализа структурного назначения выступает выявления характеристик статистической направленности системы по известной схеме. Анализ структурного назначения осуществляется с целью исследования характеристик статистической направленности сложной системы управления методом выделения составляющих и подсистем.

Синтез структурного назначения осуществляется с целью обоснованности совокупности составляющих структуры, взаимосвязей и уровней, способствующих в целом наибольший уровень соотношения с учётом указанных положений. Объектами исследовательской деятельности выступают разнообразные уровни получаемых структур управления.

Объектами исследовательской деятельности анализа функционального назначения выступают осуществляемые методы и алгоритмы управления, на базе совокупного алгоритма реализации (включает основополагающие этапы, фазы протекания и функции реализации) и метода и алгоритмы частной направленности (нацелены на реализацию различных стадий).

Составляющие синтеза характеризуются обоснованием нужной и достаточной комбинации показателей, способствующих выявлять оценку заданных свойств, проектируемой сложной системы управления и её совокупный эффект.

Любая система управления характеризуется совокупностью физических величин, по которым складывается представление о ее работе. Если исходную управляемую величину нужно изменить по определенному закону без вмешательства человека, в систему вводят управляющее устройство. Объект управления и управляющее устройство составляют систему автоматического управления [2].

Процесс управления в каждый момент времени характеризуется одним или несколькими показателями, которые отражают физическое состояние управляемого объекта (температуру, скорость, давление, электрическое напряжение и т. п.). Эти показатели в процессе управления должны

изменяться по какому-либо закону или оставаться неизменными при изменении внешних условий и режимов работы устройства [3].

Для автоматического обеспечения заданных значений параметров, определяющих необходимое протекание управляемого процесса (автоматическое регулирование) часто используются регуляторы.

Основная сложность практического применения – незнание характеристик объекта управления. Кроме того, существенную проблему представляют нелинейность и нестационарность системы. Практические регуляторы работают в ограниченном сверху и снизу диапазоне, поэтому в принципе нелинейны.

В этой связи получили распространение методы экспериментальной настройки регулятора, подключенного к объекту управления. В современных системах автоматизации, которые, как правило, строятся на базе программируемых логических контроллеров (PLC), ПИД законы управления реализуются либо как специализированные аппаратные модули, включаемые в состав управляющего контроллера, либо программными методами с применением специализированных библиотек.

Рассмотрим методы визуализации пространства допустимых решений параметров управления САУ, которые позволяют разработчику PLC ПИД закона управления существенно облегчить и ускорить параметрический синтез регуляторов по заданным требованиям к качеству управления. В результате разработана программа для расчета времени переходных процессов произвольной замкнутой системы с ПИД законом управления, который позволяет найти коэффициенты, удовлетворяющие требованиям по качеству переходного процесса.

Установим следующие требования к разрабатываемой системе:

- 1) обеспечить вывод информации о временах переходных процессов в заданной системе при различных значениях коэффициентов ПИД закона управления;

- 2) обеспечить вывод информации о перерегулировании в заданной системе при различных значениях коэффициентов ПИД закона управления;
- 3) осуществить представление выводимой информации в виде линий равного уровня;
- 4) обеспечить фильтрацию значений коэффициентов ПИД закона управления исходя из заданных требований по качеству управления;
- 5) предоставить механизм построения переходных процессов в системе при выбранных значениях коэффициентов ПИД закона управления.

Для решения поставленной задачи авторами был разработан программный проект ТТФ (Transient Time Field), принимающий на вход пять параметров:

- 1) целевое время переходного процесса;
- 2) критерий для определения времени переходного процесса;
- 3) область определения коэффициента пропорциональной составляющей;
- 4) область определения коэффициента интегральной составляющей;
- 5) область определения коэффициента дифференциальной составляющей.

Выводы: в процессе исследования было выявлено, что сложные системы управления теплофизическими процессами характеризуются значительными уровнями вложенности по структурной иерархии, неоднозначностью входящих в их состав подгрупп. В работе приведена характеристика и классификация процессов анализа и синтеза сложных систем управления.

Список литературы

1. **Рыбаков А.Н.** Компьютерные встраиваемые технологии. Ключевые тенденции. Электроника: наука, технология, бизнес. 2018. №3. - С.24- 32.
2. **Куксенюк Л.В.** Управление сложными системами управления // Проблемы механики и управления, Пермский университет, 2018.
3. **Шариков Н.В.** Моделирование управляемого движения системы управления // Известия ТулГУ. Технические науки, 2019, № 9, часть 1.

Казьмин А.И.
Kaz'min A.I.

ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и
Ю. А. Гагарина», г. Воронеж
Zhukovsky and Gagarin Voronezh Air Force Academy, Voronezh

Казьмин Александр Игоревич – к.т.н., докторант ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина».

Kaz'min Aleksandr Igorevich – candidate of technical sciences, doctoral student of the Zhukovsky and Gagarin Voronezh Air Force Academy, Voronezh

Методы поверхностных электромагнитных волн для контроля электрофизических параметров материалов и покрытий со сложной внутренней структурой

The electromagnetic surface wave methods for testing electrophysical parameters of materials and coatings with complex internal structure

Ключевые слова: поверхностная электромагнитная волна; коэффициент ослабления поля; комплексные диэлектрическая и магнитная проницаемости; дефект; операторное уравнение; нелинейный оператор.

Аннотация: Представлено формализованное описание разработанных методов поверхностных электромагнитных волн, применяемых для контроля электрофизических параметров материалов и покрытий со сложной структурой.

Key words: surface electromagnetic wave, field attenuation coefficient, complex dielectric and magnetic permeability, defect, operator equation, nonlinear operator.

Abstract: The formalized description of the developed methods of surface electromagnetic waves used to testing the electrophysical parameters of materials and coatings with a complex structure is presented.

В [1–3] на основе выявленных фундаментальных закономерностей, связывающих электрофизические параметры (ЭФП) слоистых материалов и покрытий (МП) со сложной внутренней структурой (многослойные, метаматериалы, композиционные материалы с различными наполнителями), с характеристиками поля поверхностных электромагнитных волн (ПЭМВ) развиты методы, обеспечивающие достоверный контроль их ЭФП в процессе проектирования и испытаний на эффективность. Для дальнейшего развития

представленных подходов целесообразно разработать формализованное описание разработанных методов.

В формализованном виде задача определения вектора ЭФП и параметров дефектов ξ_j плоскостойких образцов диэлектрических и магнетодиэлектрических МП со сложной структурой по измеренным характеристикам поля ПЭМВ \mathbf{r}_j сводится к решению операторного уравнением первого рода:

$$\Theta_j \cdot \xi_j = \mathbf{r}_j, \quad \xi_j \in \Xi_j, \quad \mathbf{r}_j \in \mathbf{R}_j \quad (1)$$

где Ξ_j – метрическое пространство векторов ξ_j для j – типа МП, \mathbf{R}_j – метрическое пространство характеристик поля ПЭМВ для j – типа МП; Θ_j – нелинейный оператор для j – типа МП, осуществляющий преобразование множества значений вектора ξ_j в множество значений характеристик поля ПЭМВ \mathbf{r}_j ; j в зависимости от типа МП может принимать значения приведенные в таблице 1.

Решением операторного уравнения (1) на компакте Ξ_j^k из Ξ_j будет являться элемент $\xi_{0j} \in \Xi_j^k$ минимизирующий функционал (целевую функцию) $\rho_{jR}(\Theta_j \cdot \xi_j, \mathbf{r}_{jэ})$:

$$\rho_{jR}(\Theta_j \cdot \xi_{0j}, \mathbf{r}_{jэ}) = \arg \min_{\xi \in \Xi_k} \rho_{jR}(\Theta_j \cdot \xi_j, \mathbf{r}_{jэ}), \quad (2)$$

где $\mathbf{r}_{jэ}$ – полученные в эксперименте значения измеряемой характеристики поля ПЭМВ, то есть при наличии некоторой погрешности; $\rho_{jR}(\Theta_j \cdot \xi_j, \mathbf{r}_{jэ})$ – расстояние между $\Theta_j \cdot \xi_j$ и $\mathbf{r}_{jэ}$ в метрическом пространстве \mathbf{R}_j возможных значений \mathbf{r}_j . Область Ξ_j задания ξ_j определяется границами технически возможных параметров МП. Граничные значения области \mathbf{R}_j определяются максимальными значениями характеристик поля ПЭМВ.

Для оценки качества многослойных МП ($j=1$) определяется их вектор ЭФП $\xi_1 = \{\dot{\varepsilon}_n, \dots, \dot{\varepsilon}_N, \dot{\mu}_n, \dots, \dot{\mu}_N, t_n, \dots, t_N\}$, где $\dot{\varepsilon}_n, \dots, \dot{\varepsilon}_N$ и $\dot{\mu}_n, \dots, \dot{\mu}_N$ – комплексные

диэлектрические и магнитные проницаемости слоев, t_n, \dots, t_N – толщины слоев материала. В качестве физически измеряемых характеристик поля ПЭМВ \mathbf{r}_1 выступает вектор-столбец ее комплексных коэффициентов ослабления (КО) $\dot{\mathbf{A}}_3$ или вектор-столбец действительной части комплексного КО \mathbf{A}' (табл. 1) [1–3].

Таблица 1 – Разработанные методы ПЭМВ для контроля ЭФП МП.

Тип МП	$\Theta_j \cdot \xi_j \longleftarrow \boxed{\Theta_j \cdot \xi_j = \mathbf{r}_j} \longrightarrow \mathbf{r}_j$
$j=1$ Многослойные МП	<p>где $\Theta_1 \cdot \xi_1$,</p> <p>Θ_1 - оператор, описывающий модель многослойного МП;</p> <p>$\xi_1 = \{\dot{\varepsilon}_n, \dots, \dot{\varepsilon}_N, \dot{\mu}_n, \dots, \dot{\mu}_N, t_n, \dots, t_N\}$ – вектор ЭФП многослойного МП</p>
$j=2$ МП на основе метаматериалов	<p>где $\Theta_2 \cdot \xi_2$,</p> <p>Θ_2 - оператор, описывающий модель метаматериала</p> <p>$\xi_2 = \{\varepsilon'(f_k), \varepsilon''(f_k), \mu'(f_k), \mu''(f_k), t\}$ – вектор ЭФП метаматериала, в соответствии с частотно-дисперсионными моделями Друде-Лоренца</p>
$j=3$ МП с анизотропией ЭФП	<p>где $\Theta_3 \cdot \xi_3$,</p> <p>Θ_3 - оператор, описывающий модель МП с анизотропией ЭФП</p> <p>$\xi_3 = \{\dot{\underline{\varepsilon}}, \dot{\underline{\mu}}, t\}$ - вектор ЭФП анизотропного МП,</p> <p>$\dot{\underline{\mu}} = \begin{bmatrix} \dot{\mu}_d & -j\dot{\mu}_{нд} & 0 \\ j\dot{\mu}_{нд} & \dot{\mu}_d & 0 \\ 0 & 0 & \mu_z \end{bmatrix}$, $\dot{\underline{\varepsilon}} = \begin{bmatrix} \dot{\varepsilon}_{ x} & 0 & 0 \\ 0 & \dot{\varepsilon}_{\perp y} & 0 \\ 0 & 0 & \dot{\varepsilon}_{ z} \end{bmatrix}$,</p>
$j=4$ МП с дефектами	<p>где $\Theta_4 \cdot \xi_4$,</p> <p>Θ_4 - оператор, описывающий модель МП с дефектами</p> <p>$\xi_4 = \{d_1, d_2, \dots, d_N\}$ - вектор параметров дефектов МП,</p>

Для МП на основе метаматериалов ($j=2$) оценивается вектор ЭФП $\xi_2 = \{\varepsilon'(f_k), \varepsilon''(f_k), \mu'(f_k), \mu''(f_k), t\}$, где $\varepsilon'(f_k), \varepsilon''(f_k), \mu'(f_k), \mu''(f_k)$ описываются частотно-дисперсионными моделями Друде-Лоренца [2]. В качестве физически измеряемых характеристик поля ПЭМВ \mathbf{r}_2 выступает вектор-столбец ее комплексных КО $\dot{\mathbf{A}}_3$ и вектор-столбец резонансных значений действительной части комплексного КО \mathbf{A}_R , причем $\dot{\mathbf{A}}_3 \subseteq \mathbf{A}_R$ (табл. 1).

Для анизотропных МП ($j=3$) оценивается вектор $\xi_3 = \{\dot{\varepsilon}, \dot{\mu}, t\}$, где $\dot{\varepsilon}, \dot{\mu}$ – тензоры комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей, t – толщина материала. В качестве физически измеряемых характеристик поля ПЭМВ \mathbf{r}_3 выступает вектор-столбец комплексных КО $\dot{\mathbf{A}}_3$ и угловые зависимости действительной части комплексного КО \mathbf{A}_θ , причем $\mathbf{A}_\theta \cup \dot{\mathbf{A}}_3$ (табл. 1) [3].

Для МП с дефектами ($j=4$) оценивается вектор параметров дефектов $\xi_4 = \{d_1, d_2, \dots, d_N\}$. В качестве физически измеряемых характеристик поля ПЭМВ \mathbf{r}_4 выступает вектор-столбец комплексных КО $\dot{\mathbf{A}}_3$ и вектор-столбец дисперсий действительной части комплексного КО \mathbf{A}'_D (табл. 1) [1].

Нелинейные операторы $\Theta_1, \dots, \Theta_4$ описывают распространение ПЭМВ в соответствующем типе МП и представляют собой дисперсионные уравнения на основе метода «поперечного резонанса» [1–3].

Таким образом, для соответствующего типа МП ($j = 1, \dots, 4$), с границами технически возможных параметров $\xi_{j \min} \leq \xi_j \leq \xi_{j \max}$, необходимо найти вид нелинейного оператора Θ_j и целевой функции $\rho_{jR}(\Theta_j \cdot \xi_{0j}, \mathbf{r}_{j\theta})$ операторного уравнения (1), обеспечивающие оценку неизвестных ЭФП и параметров дефектов с заданными точностью и достоверностью при минимизации целевой функции, варьированием составляющим вектора ξ_j .

Список литературы

1. **Казьмин А.И.** Оценка степени отслоения диэлектрических и магнетодиэлектрических покрытий с использованием поверхностных электромагнитных волн СВЧ диапазона / А.И. Казьмин, П.А. Федюнин // Дефектоскопия. – 2020, № 9. – С. 50–63.
2. **Казьмин А.И.** Контроль электрофизических параметров метаматериалов методом поверхностных электромагнитных волн / А.И. Казьмин, П.А. Федюнин // Дефектоскопия. – 2021, № 4. – С. 51–67.
3. **Казьмин А.И.** Контроль диэлектрической проницаемости и толщины анизотропных диэлектрических покрытий методом поверхностных электромагнитных волн / А.И. Казьмин, П.А. Федюнин, Д.П. Федюнин // Дефектоскопия. – 2021, № 6. – С. 57–72.

Казьмин А.И., Федюнин Д.П., Федюнин П.А.
Kaz'min A.I., Fedyunin D.P., Fedyunin P.A.

ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и
Ю. А. Гагарина», г. Воронеж
Zhukovsky and Gagarin Voronezh Air Force Academy, Voronezh

Казьмин Александр Игоревич – к.т.н., докторант ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»;
Федюнин Дмитрий Павлович – инженер; **Федюнин Павел Александрович**
– д.т.н., профессор, начальник кафедры ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина».

Kaz'min Aleksandr Igorevich – candidate of technical sciences, doctoral student of the Zhukovsky and Gagarin Voronezh Air Force Academy, Voronezh;
Fedyunin Dmitrii Pavlovich – engineer; **Fedyunin Pavel Aleksandrovich** – doctor of technical sciences, professor, head of department the Zhukovsky and Gagarin Voronezh Air Force Academy, Voronezh.

**Контроль электрофизических параметров анизотропных
диэлектрических покрытий многочастотным оптимизационным
методом поверхностных электромагнитных волн**

**Testing of electrophysical parameters of anisotropic dielectric coatings by
the multifrequency optimization method of surface electromagnetic waves**

Ключевые слова: поверхностная электромагнитная волна; коэффициент ослабления поля; тензор комплексной диэлектрической проницаемости; толщина; минимизация целевой функции.

Аннотация: Представлен метод контроля тензора комплексной диэлектрической проницаемости и толщины анизотропных покрытий на металлической подложке.

Key words: surface electromagnetic wave, field attenuation coefficient, complex permittivity tensor, thickness, objective function minimization

Abstract: The method for testing of complex permittivity tensor and thickness of anisotropic coatings on a metal substrate is presented.

При испытаниях на устойчивость к тепловому воздействию материалов, предназначенных для работы в диапазоне СВЧ, требуются объективные данные насколько изменились их электрофизические параметры (ЭФП) после соответствующего воздействия [1].

В [2] развит многочастотный оптимизационный метод контроля ЭФП многослойных материалов и покрытий с использованием поверхностных электромагнитных (ПЭМВ) СВЧ диапазона. Представляется перспективным дальнейшее развитие метода в целях контроля покрытий с анизотропией комплексной диэлектрической проницаемости.

Геометрия задачи контроля анизотропных РПМ приведена на рис. 1.

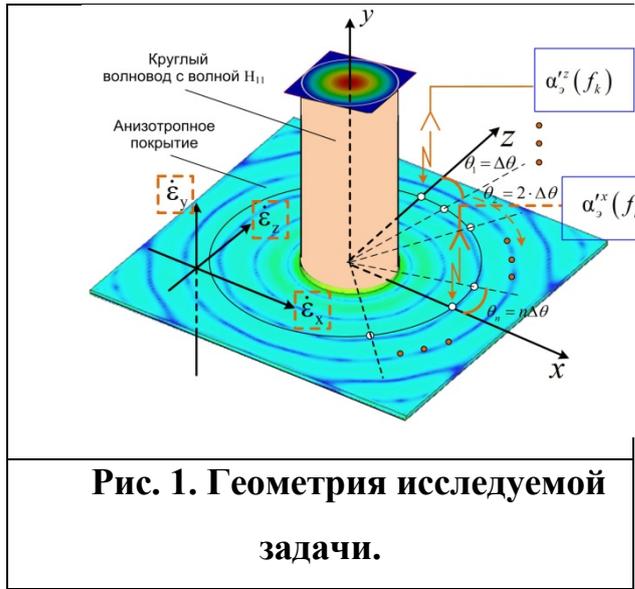


Рис. 1. Геометрия исследуемой задачи.

С учетом подходов приведенных в [2], метод оценки вектора электрофизических и геометрических параметров (ЭФГП) анизотропных покрытий $\hat{\xi}_{\text{п}} = \{ \epsilon'_{\square x}, \epsilon''_{\square x}, \epsilon'_{\perp y}, \epsilon''_{\perp y}, \epsilon'_{\square z}, \epsilon''_{\square z}, t_{\text{п}} \}$, где $\epsilon'_{\square x}, \epsilon'_{\perp y}, \epsilon'_{\square z}$ действительные и $\epsilon''_{\square x}, \epsilon''_{\perp y}, \epsilon''_{\square z}$ мнимые части компонент тензора $\hat{\epsilon}$ диэлектрической

проницаемости, соответственно, $t_{\text{п}}$ – толщина покрытия сводится к минимизации целевой функции $Z(\xi_{\text{п}}, \varphi_{\alpha}^x, \varphi_{\alpha}^z)$, построенной как невязка между вектор-столбцами полученных экспериментально $\mathbf{A}_{\text{э}}$ и теоретических $\mathbf{A}_{\text{т}}$ значений коэффициентов ослабления поля ПЭМВ:

$$\hat{\xi}_{\text{п}} = \arg \min_{\xi_{\text{п}}, \varphi_{\alpha}^x, \varphi_{\alpha}^z} \{ Z(\xi_{\text{п}}, \varphi_{\alpha}^x, \varphi_{\alpha}^z) \}, \quad (1)$$

$$Z(\xi_{\text{п}}, \varphi_{\alpha}^x, \varphi_{\alpha}^z) = \frac{1}{L} |\mathbf{A}_{\text{э}} - \mathbf{A}_{\text{т}}|^2, \quad (2)$$

где $\mathbf{A}_{\text{э}}$ и $\mathbf{A}_{\text{т}}$ – вектор-столбцы, со следующими компонентами:

$$\mathbf{A}_{\text{э}} = \left[\alpha_{\text{э}}^x(f_1) - j\alpha_{\text{э}}''^x(f_1, \varphi_{\alpha}^x), \quad \alpha_{\text{э}}^x(f_2) - j\alpha_{\text{э}}''^x(f_2, \varphi_{\alpha}^x), \dots, \alpha_{\text{э}}^x(f_K) - j\alpha_{\text{э}}''^x(f_K, \varphi_{\alpha}^x), \right. \\ \left. \alpha_{\text{э}}^z(f_1) - j\alpha_{\text{э}}''^z(f_1, \varphi_{\alpha}^z), \quad \alpha_{\text{э}}^z(f_2) - j\alpha_{\text{э}}''^z(f_2, \varphi_{\alpha}^z), \dots, \alpha_{\text{э}}^z(f_K) - j\alpha_{\text{э}}''^z(f_K, \varphi_{\alpha}^z) \right]^T;$$

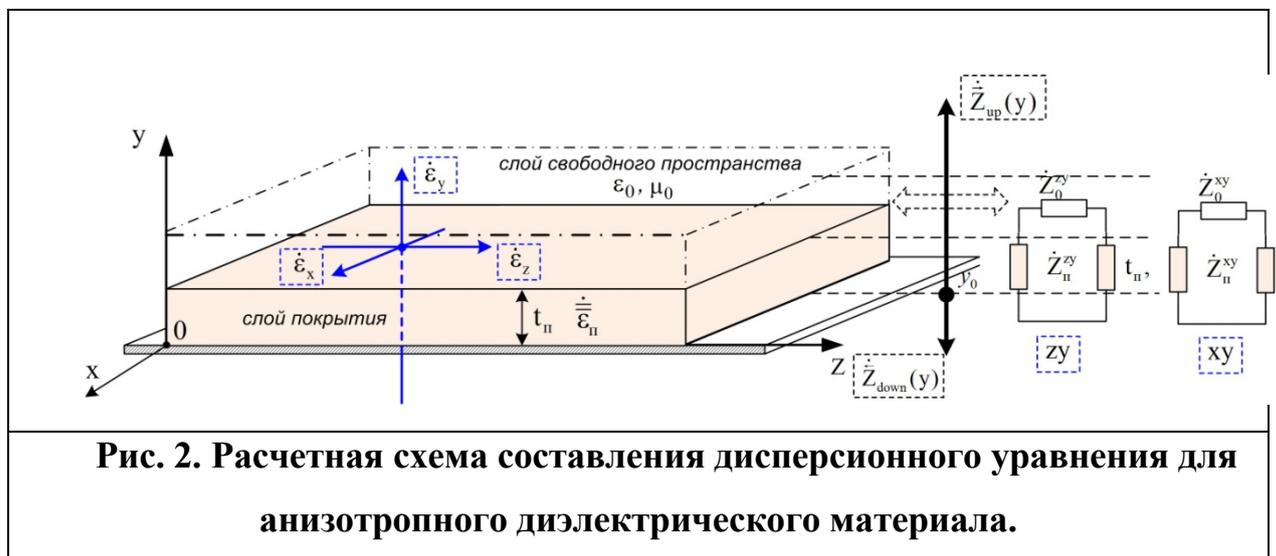
$$\mathbf{A}_{\text{т}} = \left[\dot{\alpha}_{\text{т}}^x(f_1, \xi_{\text{п}}), \quad \dot{\alpha}_{\text{т}}^x(f_2, \xi_{\text{п}}), \dots, \dot{\alpha}_{\text{т}}^x(f_K, \xi_{\text{п}}), \dot{\alpha}_{\text{т}}^z(f_1, \xi_{\text{п}}), \dot{\alpha}_{\text{т}}^z(f_2, \xi_{\text{п}}), \dots, \dot{\alpha}_{\text{т}}^z(f_K, \xi_{\text{п}}) \right]^T,$$

где $\alpha'_y(f_k) - j\alpha''_y(f_k, \Phi_\alpha^x)$ и $\alpha'_z(f_k) - j\alpha''_z(f_k, \Phi_\alpha^z)$ – экспериментальные коэффициенты ослабления поля ПЭМВ по осям поперечной анизотропии x и z , соответственно, $\Phi_\alpha^x = \{a_{n-i}^x\}$, $\Phi_\alpha^z = \{a_{n-i}^z\}$ – параметры регрессии функциональной зависимости мнимой части коэффициента ослабления, $i=0, \dots, n$; $\dot{\alpha}_T^x(f_k, \xi_n)$ и $\dot{\alpha}_T^z(f_k, \xi_n)$ – теоретические коэффициенты ослабления поля ПЭМВ по осям поперечной анизотропии x и z , соответственно, $k=1, 2, \dots, K$.

Теоретические значения комплексных коэффициентов ослабления для каждой из поперечных осей анизотропии $\dot{\alpha}_T^x(f, \xi_n)$ и $\dot{\alpha}_T^z(f, \xi_n)$ ПЭМВ рассматриваемого анизотропного покрытия получали путем решения дисперсионных уравнений на частотах f_k , $k=1, 2, \dots, K$:

$$D[\dot{\alpha}^{xy}(f, \xi_n); f_k] = 0; \quad D[\dot{\alpha}^{zy}(f, \xi_n); f_k] = 0. \quad (3)$$

Дисперсионные уравнения (3) составляли, используя согласно [6], метод «поперечного резонанса». Расчетная схема составления дисперсионных уравнений (3) приведена на рис. 2.



В качестве примера рассмотрим результаты измерения ЭФГП образца композиционного материала антенного обтекателя малогабаритной радиолокационной станции с инверсным синтезированием апертуры. Данный образец материала реализован на основе полиамида-6, который усилен

стекловолокном [3]. Провели измерения плоскостойкого образца данного композиционного материала, с толщиной равной толщине боковой стенки антенного обтекателя.

На рис. 3 приведены зависимости коэффициентов ослабления на главных осях поперечной анизотропии (в плоскости листа): $\alpha'_y(f_k)$, $\alpha'_z(f_k)$, для композиционного материала данного антенного обтекателя. Была обнаружена как продольная анизотропия диэлектрической проницаемости, так и нормальная. Средние значения компонент тензора диэлектрической проницаемости образца получены следующие: $\epsilon_x \approx 4,5 - j0,07$, $\epsilon_y \approx 4,5 - j0,07$, $\epsilon_z \approx 4,7 - j0,08$.

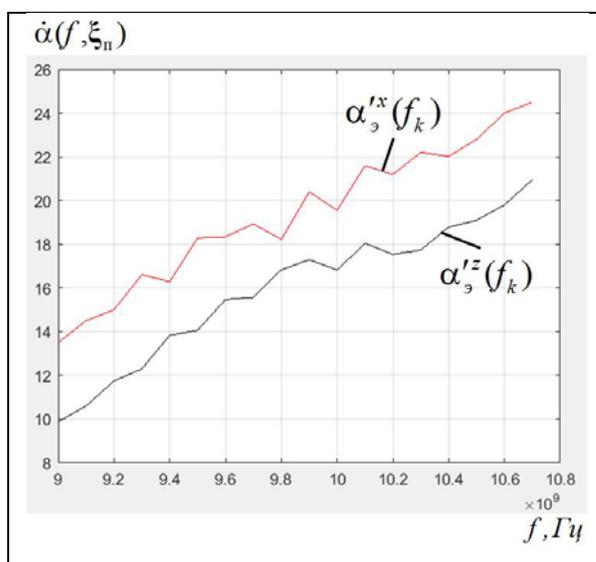


Рис. 3. Частотные зависимости коэффициента ослабления, для композиционного материала антенного обтекателя.

Учет данных измерений обтекателя позволил скорректировать параметры диаграммы направленности антенны радиолокационной станции и реализовать ее потенциальные характеристики на практике.

Таким образом, представлен новый метод измерения ЭФП покрытий с анизотропией диэлектрической проницаемости. Проведенные экспериментальные исследования показали

принципиальную возможность точного и достоверного контроля компонент тензора диэлектрической проницаемости и толщины реальных образцов материалов. Применение метода позволяет повысить эффективность применения покрытий, работающих в диапазоне СВЧ.

Список литературы

1. **Иванова В.И.** Разработка широкополосного радиопоглощающего покрытия с высокими эксплуатационными свойствами / В.И. Иванова и др. // Журнал радиоэлектроники. – 2016, № 7. – С. 1–23.
2. **Казьмин А.И.** Контроль диэлектрической проницаемости и толщины анизотропных диэлектрических покрытий методом поверхностных электромагнитных волн / А.И. Казьмин, П.А. Федюнин, Д.П. Федюнин // Дефектоскопия. – 2021, № 6. – С. 57–72.
3. **Купряшкин И.Ф.** Малогабаритные многофункциональные РЛС с непрерывным частотно-модулированным излучением / И.Ф. Купряшкин, В.П. Лихачев, Л.Б. Рязанцев. – М.: Радиотехника, 2020. – 279 с.

И.В. Рязанов, П.В. Балабанов, С.А. Сенкевич
I.V. Ryazanov, P.V. Balabanov, S.A. Senkevich

«Тамбовский государственный технический университет», Тамбов
«Tambov State Technical University», Tambov

Рязанов Иван Викторович – аспирант кафедры «Мехатроника и технологические измерения»; **Балабанов Павел Владимирович** – д.т.н., доцент, заведующий кафедры «Мехатроника и технологические измерения»; **Сенкевич Сергей Алексеевич** – студент кафедры «Мехатроника и технологические измерения».

Ryazanov Ivan Viktorovich is a post-graduate student of the Department of Mechanical Engineering and Technological Measurements; **Balabanov Pavel Vladimirovich** - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department "Mechatronics and Technological Measurements"; **Senkevich Sergey Alekseevich** - student of the Department "Mechatronics and Technological Measurements".

Система теплового контроля работоспособности изолирующего дыхательного аппарата

The system of thermal control of the performance of the insulating breathing apparatus

Ключевые слова: изолированный дыхательный аппарат, регенеративный продукт, система контроля.

Аннотация: Предложена система теплового контроля для работоспособности изолирующего дыхательного аппарата (ИДА). Метод основан на контроле температуры регенеративного материала. Реализация метода осуществляется при помощи датчиков температуры, установленные в патрон ИДА и микроконтроллера, который анализирует данные и активизирует светодиоды, в момент времени, когда кислорода не хватает для жизнеобеспечения человека.

Keywords: isolated breathing apparatus, regenerative product, control system.

Abstract: A thermal control system for the operability of an insulating breathing apparatus (IDA) is proposed. The method is based on temperature control of regenerative material. The method is implemented using temperature sensors installed in the IDA cartridge and a microcontroller that analyzes the data and activates the LEDs at a time when there is not enough oxygen for human life support.

Для жизнеобеспечения человека при техногенных авариях или экологических катастрофах, в условиях, где человеку необходим запас кислорода для выполнения работ (в шахте, при работе с отравляющими веществами), используются изолирующие дыхательные аппараты ИДА, такие как СПИ-20, ШССТ, ПДУ, ИПК и т.д. В качестве регенеративного вещества в изолирующих дыхательных аппаратах и установках регенерации воздуха широкое применение получили перекисные соединения щелочных металлов. Принцип их работы основан на поглощении диоксида углерода и паров воды, а так же выделении кислорода. Указанные функции позволяют обеспечивать жизнедеятельность человека в условиях непригодного для дыхания воздуха окружающей среды.

Ресурс ИДА существенно зависит от внешних условий работы аппарата - температуры окружающей среды, нагрузки по кислороду и диоксиду углерода, зависящей от состояния кардиореспираторной системы человека. При проверке качества ИДА во время испытаний, или во время непосредственного использования, человек испытывает стресс. Это часто сопровождается нарушением адекватного восприятия испытуемым или защищаемым человеком своего состояния и технической исправности изделия. Для более комфортного и безопасного для здоровья использования ИДА мы предлагаем систему мониторинга его технического состояния на основе теплового контроля. Такая система может быть частью конструкции ИДА.

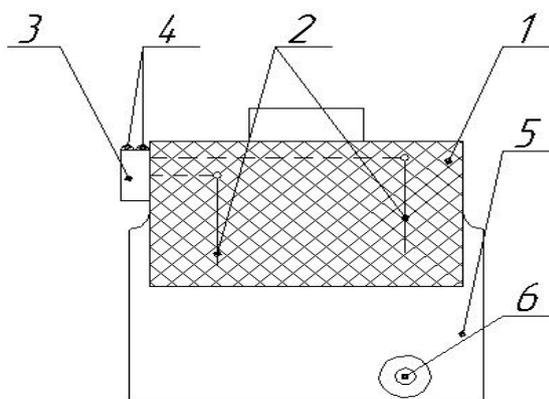
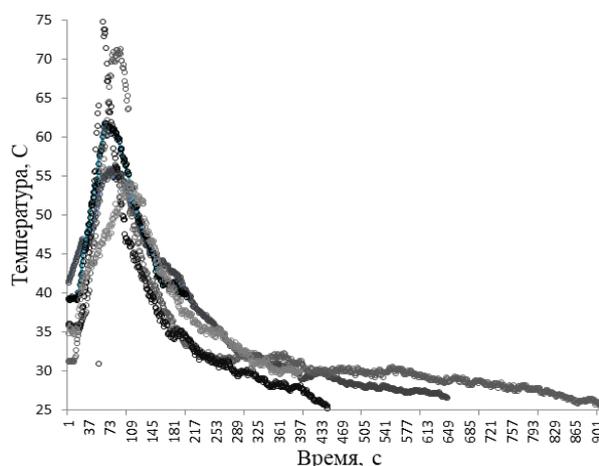
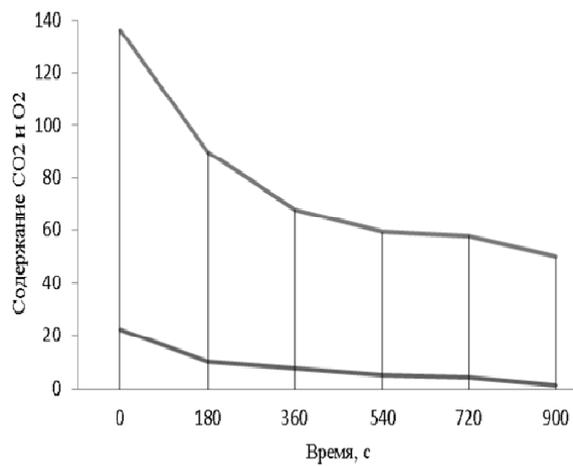


Рис. 1 Патрон ИДА с системой контроля работоспособности.

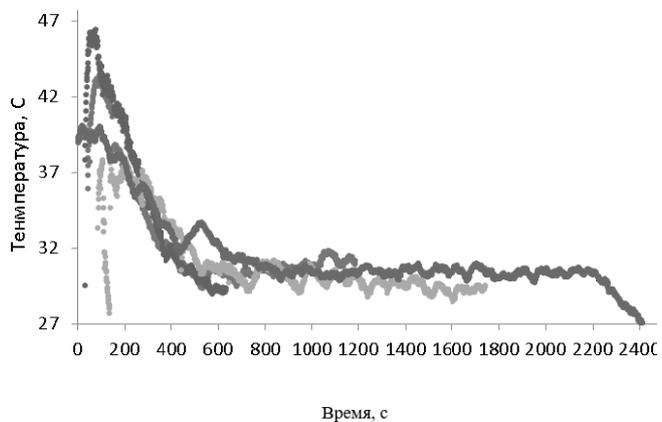
Предлагаемая система устанавливается в ИДА, включающим патрон 1 с регенеративным продуктом, дыхательный мешок 5 для сбора газовой смеси с клапаном 6, а также дыхательную маску (на рисунке не показана). Система контроля включает датчики температуры 2, размещенные в патроне ИДА 1, подключенные к микроконтроллеру 3 и устройство световой сигнализации 4. В процессе поглощения CO_2 и паров воды, выдыхаемых человеком, регенеративный продукт выделяет тепло. Чем интенсивнее протекает реакция, тем выше температура регенеративного продукта и наоборот. Датчики 2 измеряют температуру, передают сигналы в микроконтроллер 3, который обрабатывает их и вырабатывает команду на включение светодиодов сигнализации в момент времени, когда количество выделяемого кислорода недостаточно для обеспечения потребностей дыхания. Для проверки возможности реализации такого подхода в настоящее время проводится серия экспериментов.

Первый этап этих экспериментов состоит в том, что регенеративную пластину размерами 100x100x2 мм помещают в герметичную камеру и создают условия регенерации воздуха - поддерживают 1-4% концентрацию CO_2 и 85% влажность, с помощью тепловизионной камеры измеряют температуру пластины, в заданные моменты времени отбирают пробу на химический анализ содержания CO_2 и O_2 в пластине. Примеры полученных результатов приведены на рисунках.

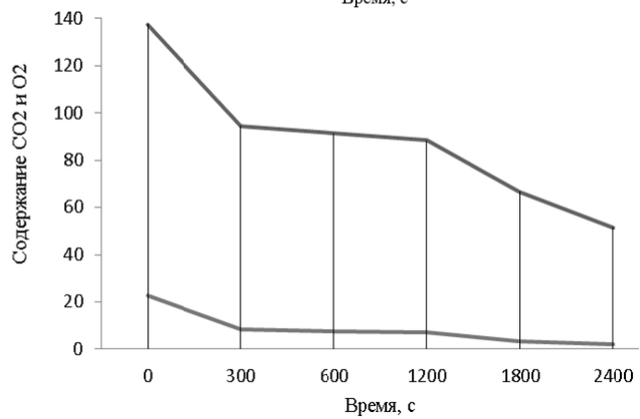




а

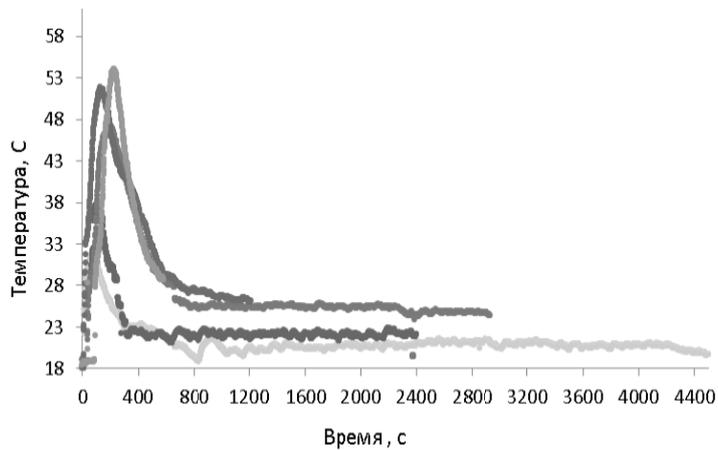


Время, с

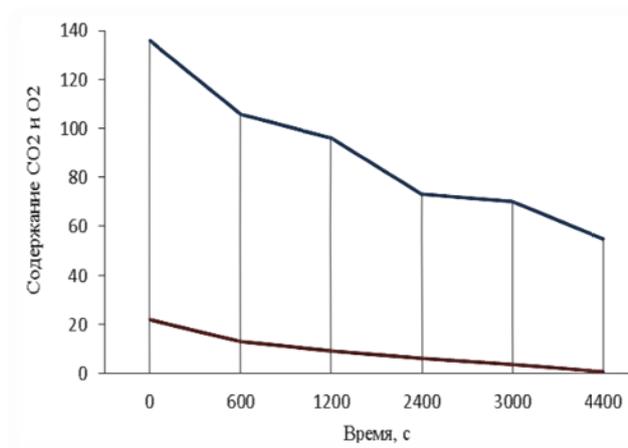


Время, с

б



Время, с



В

Рис. 2 – Изменение во времени среднеинтегральной температуры поверхности пластины KO_2 и концентрации O_2 и CO_2 при условиях: а – $C=4\pm0,5\%$, $\varphi=82\pm2\%$; б – $C=2\pm0,5\%$, $\varphi=82\pm2\%$ в – $C=1\pm0,5\%$, $\varphi=82\pm2\%$.

Предварительные результаты экспериментов однозначно доказывают, что температура пластины регенеративного материалы зависит от содержания химически связанного O_2 и CO_2 , а потому может быть использована в качестве косвенного параметра определения ресурса ИДА.

Список литературы

1. **Балабанов П.В.**, Рязанов И.В., Метод и установка для лабораторных испытаний ресурса защитных свойств пластины хемосорбента // Севастополь ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 2020.-1013-1018 с.
2. **Лыков А.В.**, Теория теплопроводности // Изд. «Высшая школа», Москва 1967.-327-333 с.

Титов М.Ю., Карасев П.И., Карамышева Е.О.
Titov M.Y., Karasev P.I., Karamysheva E.O.

МИРЭА - Российский технологический университет
MIREA – Russian technological university

Титов Михаил Юрьевич – к.т.н., доцент кафедры КБ-1 РТУ МИРЭА;
Карасев Павел Игоревич – к.т.н., доцент кафедры КБ-1 РТУ МИРЭА;
Карамышева Екатерина Олеговна – аспирант кафедры КБ-1 РТУ МИРЭА.

Titov Michail Yurievich - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the KB-1 Department of RTU MIREA; **Karasev Pavel Igorevich** - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the KB-1 Department of RTU MIREA; **Karamysheva Ekaterina Olegovna** - postgraduate student of the KB-1 Department of RTU MIREA.

Подход проектирования систем управления теплофизическими процессами

Designing method thermal process control systems

Ключевые слова: теплофизическая система, синтез, анализ, структура, объект, исследовательский процесс, автоматизация.

Аннотация: в работе затронута проблема повышения устойчивости функционирования систем управления при внешних воздействиях путём использования возможностей системы информационного обмена. Определена задача внутреннего и внешнего проектирования систем управления теплофизическими процессами.

Key words: thermophysical system, synthesis, analysis, structure, object, research process, automation.

Abstract: The work touches upon the problem of increasing the stability of the functioning of control systems under external influences by using the capabilities of the information exchange system. The task of internal and external design of control systems for thermophysical processes has been determined.

Понятие системы не имеет чёткого определения. Под системой понимают то, что состоит из отдельных частей. Любая система может быть декомпозирована на отдельные элементы. Каждая из этих частей также может быть системой. В общем случае понятие «система» выделяется как упорядоченная совокупность двух и более взаимосвязанных и

взаимодействующих элементов, образующих единое функциональное целое, предназначенное для решения конкретных задач.

Важнейшей задачей проектировщиков является построение оптимальных систем. Оптимальная система – система, которая наилучшим образом отвечает поставленной перед ней цели.

Структура системы – это способ (совокупность) связей между частями (элементами). Если связь отсутствует, то элементы не образуют систему, а лишь множество. Связи могут характеризоваться направлением и иметь численные характеристики. Характеристиками могут являться функции времени, зависящие от элементов систем. Связи могут носить симметричный и несимметричный характер.

Наряду с определением системы, стоит «процесс». Входами к процессу обычно являются выходы других процессов, входами могут быть специфические требования, включая всевозможные ресурсы, используемые в процессе выполнения некоторой деятельности. На выходе в зависимости от степени удовлетворения требований получается сам результат процесса.

Важной составляющей является процесс управления, главное предназначение которого – управление деятельностью предприятий, сложных промышленных объектов. По своей природе управленческие задачи являются информационными [1].

Современная система управления теплофизическими процессами является продуктом работы больших коллективов исполнителей. Вопросы организации работ, привлечения исполнителей сказываются на принятии решений по проекту создания системы. Поэтому анализ эффективности проектируемой системы нельзя осуществлять отдельно от вопросов организации и возможностей реализации проектных решений [2].

Понятие больших систем управления теплофизическими процессами (БСУТП) было введено после возникновения крупных энергетических сетей, в которых наблюдаются процессы, непредсказуемые при анализе отдельных элементов сети.

В настоящее время важнейшим направлением практической деятельности в области обмена информацией в БСУТП является решение задачи, позволяющей с максимальной эффективностью связать воедино процессы сбора, обработки, передачи, отображения и использования данных [3].

При составлении целевой функции в задаче оптимального проектирования используется математическая модель, где в качестве независимых переменных выступают внутренние параметры систем, а значению функции соответствуют внешние параметры систем. Решение задачи оптимального проектирования систем заключается в выборе варианта проекта, который бы при удовлетворении заданных ограничений определял экстремальное значение некоторой величины, характеризующей безопасность систем. Выбор оптимального варианта систем осуществляется следующим образом: экспертная комиссия обрабатывает требования заказчика и определяет возможные варианты декомпозиции систем, а также составляет технические задания на варианты реализации подсистем. Затем для каждого варианта декомпозиции отдельно решается задача оптимизации для подсистем.

Результатом работы является оптимальный вариант систем.

Предположим, что известны формализованные требования:

$$G = \{U; \Omega; \vec{K}; \Omega_{\vec{K}}\} \quad (1)$$

$$\vec{K} = \langle k_1; k_2; k_3; \dots; k_{G=\{U; \Omega; \vec{K}; \Omega_{\vec{K}}\}; i}; \dots; k_p \rangle \Rightarrow \gamma = F(x_1, x_2, \dots, x_m) = J(y_1, y_2, \dots, y_n), \quad (2)$$

где, $\vec{K} = \langle k_1; k_2; k_3; \dots; k_i; \dots; k_p \rangle$ – показатели качества;

$\vec{X} = \langle x_1, x_2, \dots, x_m \rangle$ – внешние характеристики систем;

$\vec{Y} = \langle y_1, y_2, \dots, y_n \rangle$ – внутренние характеристики систем.

Если никаких дополнительных условий нет, то поиск *min* заданной целевой функции может быть осуществлён с помощью стандартных методов анализа, сводящийся к удовлетворению необходимых условий существования экстремума и достаточных условий существования *min*.

Необходимое условие сводится к тому, что заданная на всём множестве $X \rightarrow$ непрерывная функция имеет первую производную, равную нулю:

$$\begin{aligned} \frac{d\gamma}{dx} = 0 &\Rightarrow \nabla\gamma = \frac{\partial\gamma}{\partial x_1} \vec{e}_1 + \frac{\partial\gamma}{\partial x_2} \vec{e}_2 + \frac{\partial\gamma}{\partial x_i} \vec{e}_i \dots + \frac{\partial\gamma}{\partial x_n} \vec{e}_n = 0; \\ \frac{dJ}{dy} = 0 &\Rightarrow \nabla J = \frac{\partial J}{\partial y_1} \vec{e}_1 + \frac{\partial J}{\partial y_2} \vec{e}_2 + \frac{\partial J}{\partial y_i} \vec{e}_i \dots + \frac{\partial J}{\partial y_n} \vec{e}_n = 0 \\ \nabla &= \frac{\partial}{\partial x_1(\partial y_1)} \vec{e}_1 + \frac{\partial}{\partial x_2(\partial y_2)} \vec{e}_2 + \frac{\partial}{\partial x_i(\partial y_i)} \vec{e}_i \dots + \frac{\partial}{\partial x_n(\partial y_n)} \vec{e}_n; \end{aligned} \quad (3)$$

Чтобы отобрать из этих точек *min*, необходимо выполнение достаточного условия. В случае с одной переменной – это положительность второй производной.

Если функция имеет сложный характер (множество *min*), то необходимо искать глобальный *min*, то есть - \min_{min} . Если заданы дополнительные условия, то поиск экстремума усложняется. Выполнение необходимого и достаточного условий существования экстремума не гарантирует нахождение *min*, поскольку *min* может лежать на границе области определения. В этом случае для него вышеуказанные условия не работают. Если ограничения задают области существования \vec{X}, \vec{Y} то физический смысл имеют только те значения γ, J . которые соответствуют указанным областям \vec{X}, \vec{Y} поэтому при анализе на экстремум следует проверять только те значения γ, J . которые соответствуют областям определения \vec{X}, \vec{Y} . Минимальные значения γ, J могут соответствовать некоторой граничной точке, лежащей на контуре областей существования величин γ, J .

Вывод: приведен подход проектирования БСУТП. Представлено обоснование необходимости создания системы информационного обмена, позволяющей с максимальной эффективностью связать воедино процессы сбора, обработки, передачи, отображения и использования данных для решения практических задач. Затронута проблема повышения устойчивости функционирования БСУТП при внешних воздействиях путём использования возможностей системы информационного обмена. Определена задача внутреннего и внешнего проектирования больших систем. Приведены

качественные и количественные показатели, на основе которых решается задача оптимизации.

Список литературы

1. **Викторова В.С.** Модели и методы расчета надежности технических систем. - Москва: Наука, 2014. – 752 с.

2. **Белый В.М.,** Белый Р.В. Эффективность информационных систем и информационных технологий: учебник, - г. Королёв МО: ФТА, 2013. – 765 с.

3. **Емельянов С.В.** и др. Методы нелинейного анализа в задачах управления и оптимизации. - М.: Едиториал УРСС, 2016. – 120 с.

УДК 53.088

**Громов Ю.Ю.¹, Самойлов В.Д.², Семисчастнов А.Е.², Мерочкин А.С.²,
Клонин И.П.²**
**Gromov Y.Y.¹, Samoilov V.D.², Semischastnov A.E.², Merochkin A.S.²,
Klonin I.P.²**

¹Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов;

²Межвидовой центр подготовки и боевого применения войск радиоэлектронной борьбы (учебный и испытательный), г. Тамбов

¹Tambov State Technical University, Tambov; ²Interspecific center of training and combat employment of troops of electronic warfare (training and testing), Tambov

Громов Юрий Юрьевич – доктор технических наук, профессор, директор института автоматизации и информационных технологий; **Самойлов Вадим Дмитриевич** – оператор научной роты; **Семисчастнов Андрей Евгеньевич** – оператор научной роты; **Мерочкин Алексей Сергеевич** – оператор научной роты; **Клонин Илья Павлович** – оператор научной роты.

Gromov Yuri Yurievich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Institute of Automation and Information Technologies; **Samoilov Vadim Dmitryevych** – operator of the scientific troop; **Semischastnov Andrey Evgenyevich** – operator of the scientific troop; **Merochkin Alexey Sergeevich** – operator of the scientific troop; **Klonin Ilya Pavlovich** – operator of the scientific troop.

Алгоритмы фильтрации изображений в инфракрасном диапазоне для мехатронных систем

Infrared Image Filtering Algorithms for Mechatronic Systems

Ключевые слова: изображения в инфракрасном диапазоне, медиальный фильтр, устранение шумов.

Аннотация: Рассмотрен алгоритм фильтрации шумов на изображениях в инфракрасном диапазоне для мехатронных систем.

Key words: infrared images, medial filter, noise reduction.

Abstract: An algorithm for filtering noise in images in the infrared range for mechatronic systems is considered.

На текущий момент тепловая съёмка применяется для исследования и мониторинга антропогенных объектов. Все природные и антропогенные объекты на поверхности Земли — растительность, почвы, горные породы, воды суши и океана, здания и сооружения излучают тепловые инфракрасные

волны, что обуславливает возможность дистанционной регистрации этого излучения и изучения тепловых свойств объектов.

Съёмочные системы, созданные для получения снимков в тепловом инфракрасном диапазоне, регистрируют собственное излучение объектов и преобразуют его в значения яркости изображения. Интенсивность теплового излучения зависит от температуры излучающего объекта, поэтому на основе зарегистрированных значений интенсивности излучения объектов можно получить значения их температуры. При этом следует отметить важную особенность изображений, полученных в тепловом инфракрасном диапазоне: они регистрируют не температуру объектов, а интенсивность теплового излучения. Тепловые снимки содержат информацию о температуре поверхности, которую практически невозможно получить каким-либо иным способом.

Другим преимуществом съёмки в тепловом инфракрасном диапазоне является возможность обнаружения объектов за счёт различий в их излучаемой способности в отсутствии естественного освещения. Это свойство позволяет наблюдать предметы в полной темноте. Однако следует отметить, что в ночное время объекты имеют иные соотношения интенсивности теплового излучения, нежели в дневное. Отсюда вытекает третье преимущество съёмки в тепловом диапазоне: широкие возможности регистрации динамичных тепловых процессов, в частности, таких, которые происходят в течение суток. Очевидно, что можно проследивать также и другие виды динамики интенсивности теплового излучения: сезонную, многолетнюю и т.д.

Из-за несовершенства формирующих и регистрирующих мехатронных систем записанное ими тепловое инфракрасное изображение представляет собой нечеткую копию оригинала [1]. Поэтому полученные снимки часто имеют дефекты, одним из множества таких изъянов является шум. Чаще всего присутствие шума на тепловом инфракрасном изображении является

следствием случайных воздействий, которые можно описать тремя моделями: аддитивной, мультипликативной и импульсной

Наиболее распространенным видом шумов является аддитивный. Он возникает, когда сигнал на выходе изображающей системы может рассматриваться как сумма полезного сигнала и случайного сигнала (шума).

Так как изображение имеет дефекты, анализ его содержимого для принятия решения значительно усложняется. Следовательно, необходимо создать механизм восстановления теплового инфракрасного изображения.

В работе для решения проблемы устранения шумов на тепловых инфракрасных изображениях, предлагается использовать медианный фильтр, который относится к нелинейным пространственным методам.

Медианный фильтр имеет промежуточное положение по соотношению скорость/качество среди всех прочих алгоритмов и не имеет множества параметров, которые уменьшают степень автоматизма процесса устранения дефектов, в основном он используется для подавления аддитивного и импульсного шумов на изображении.

Двумерный медианный фильтр с «окном» W определяется следующим образом:

$$f'(m, n) = medy(m, n) = med[y(m + k, n + l): (k, l) \in W] \quad (1)$$

Медианный фильтр используется для подавления аддитивного и импульсного шумов на изображении. Характерной особенностью медианного фильтра, отличающей его от линейного сглаживающего, является сохранение перепадов яркости (контуров). Действие этого фильтра, как следует из его названия, состоит в замене значения в точке изображения на медиану значений яркости в окрестности этой точки [2]. Особенно эффективным медианный фильтр является в случае импульсного шума.

Исследование устранения дефектов на тепловом изображении проводилось с помощью «Интеллектуальной системы», разработанной на языке Python с помощью библиотеки OpenCv [3] в научной ротации войск РЭБ ВС РФ. В качестве примера рассмотрим изображения 1, 2 и 3, где тепловое

инфракрасное изображение сначала зашумляется аддитивным шумом «Соль и перец», а затем восстанавливается с помощью медиального фильтра.



Рис. 1. Исходное тепловое инфракрасное изображение.

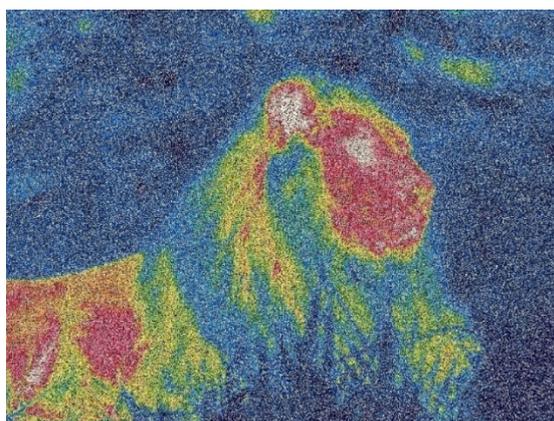


Рис. 2. Тепловое инфракрасное изображение с добавлением аддитивного шума «соль и перец».

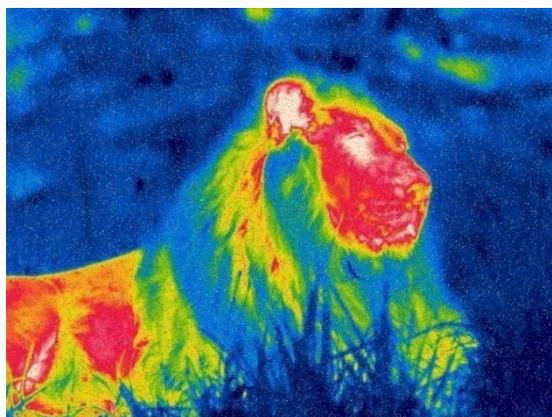


Рис. 3. Восстановленное медиальным фильтром тепловое инфракрасное изображение.

Список литературы

1. **Сизиков В.С.** Прямые и обратные задачи восстановления изображений, спектроскопии и томографии с MatLab: учебное пособие / В.С.Сизиков– Санкт Петербург : Изд-во «Лань», 2017. - 412 с. - (Учебники для вузов, специальная литература). -ISBN 978-5-8114-2754-3. - Текст: непосредственный.

2. **Гонсалес Р.** Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс.– 3-е изд. исправ. и доп. - Москва: Техносфера, 2012. - 1104 с. - ISBN 978-5-94836-331-8. – Текст: непосредственный.

3. **Библиотека** обработки изображений OpenCV: [сайт].– 2020. URL: <http://opencv.org> (дата обращения: 29.09.2021). - Текст: электронный.

**Шатских В.В., Самойлов В.Д., Мерочкин А.С., Семисчастнов А.Е.,
Клонин И.П.**

**Shatskih V.V., Samoilov V.D., Merochkin A.S., Semischastnov A.E.,
Klonin I.P.**

Межвидовой центр подготовки и боевого применения войск радиоэлектронной борьбы (учебный и испытательный), г. Тамбов
Interspecific center of training and combat employment of troops of electronic warfare (training and testing), Tambov

Шатских Виктор Васильевич – командир научной роты, старший научный сотрудник роты (научной); **Самойлов Вадим Дмитриевич** – оператор научной роты; **Мерочкин Алексей Сергеевич** – оператор научной роты; **Семисчастнов Андрей Евгеньевич** – оператор научной роты; **Клонин Илья Павлович** – оператор научной роты.

Shatskih Viktor Vasilevich – commander of a scientific troop, senior researcher of a troop (scientific); **Samoilov Vadim Dmitryevych** – operator of the scientific troop; **Merochkin Alexey Sergeevich** – operator of the scientific troop; **Semischastnov Andrey Evgenyevich** – operator of the scientific troop; **Klonin Ilya Pavlovich** – operator of the scientific troop.

Алгоритм формирования панорамного изображения в инфракрасном диапазоне

Algorithm for forming a panoramic image in the infrared range

Ключевые слова: изображение в инфракрасном диапазоне, беспилотные летательные аппараты, создание панорамного изображения в инфракрасном диапазоне.

Аннотация: Рассмотрен алгоритм создания инфракрасного панорамного изображения городских объектов с помощью изображений съёмки их беспилотным летательным аппаратом.

Key words: infrared image, unmanned aerial vehicles, creation of a panoramic image in the infrared range.

Abstract: An algorithm for creating an infrared panoramic image of urban objects using images taken by an unmanned aerial vehicle is considered.

На текущий момент тепловая съёмка применяется для исследования и мониторинга за объектами такими, как трубопроводы, потоки загрязнённых вод, промышленные объекты, объекты городского хозяйства. Снимки, полученные в тепловом инфракрасном диапазоне, называются

термограммы – изображения в инфракрасных лучах, показывающие картину распределения температурных полей. Термографические камеры обнаруживают излучение в инфракрасном диапазоне электромагнитного спектра и на основе этого излучения создают изображения, позволяющие определить перегретые или переохлаждённые места. Также тепловые инфракрасные изображения является очень полезными при обнаружении сырости. Температуру поверхностей можно спрогнозировать при условии, что значения температуры воздуха и относительной влажности помещения являются входными параметрами. Многие камеры имеют программное обеспечение для выполнения такого рода вычислений и отображают риск конденсации по цветовому наложению на тепловом изображении.

Одной из сфер использования тепловой съемки является тепловизионное обследование объектов городского типа. Тепловизионное обследование представляет собой метод визуализации и количественной оценки изменений температуры по всей поверхности исследования объекта. В результате обследования получают своевременное и быстрое выявление локальных перегревов, нарушений систем охлаждения, проблем в равномерности распределения напряжения по участкам систем.

Для оперативного выявления перечисленных дефектов предлагается воспользоваться быстроразвивающимся в текущий момент направлением, а именно использование беспилотных летательных аппаратов (БЛА), оснащенных тепловизором. Но создание тепловых инфракрасных снимков отдельных элементов объектов городского типа может быть недостаточным для формирования общей картины дефектов здания. Для этого предлагается использовать тепловые инфракрасные панорамные изображения объектов.

На сегодняшний момент панорамные тепловизионные системы являются весьма дорогостоящими, нуждаются в обслуживании и калибровке [1]. Целью данной работы является описание алгоритма создания панорамных тепловых инфракрасных изображений из последовательности перекрывающихся снимков сцены.

Для создания панорамного изображения предлагается использовать алгоритм, включающий 5 этапов:

1. сначала вычисляются ключевые точки на изображениях с помощью таких методов, как SIFT, SURF, ORB, BRISK [2]. Они рассчитываются как экстремумы яркости на тепловом инфракрасном изображении;

2. далее между соседними изображениями определяются наборы совпадающих ключевых точек с помощью методов k-ближайших соседей или слепого поиска;

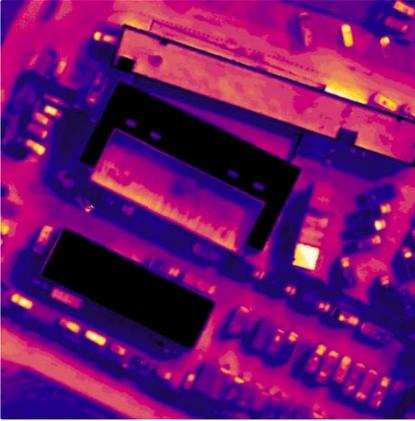
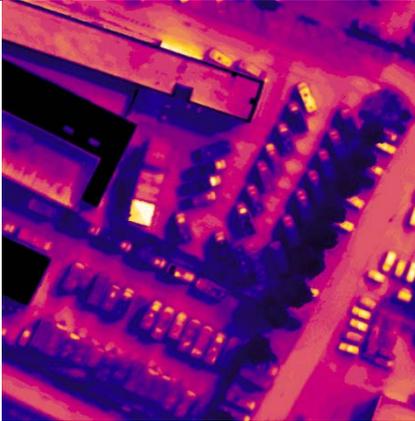
3. по результирующим наборам ключевых точек двух тепловых инфракрасных изображений с помощью метода RANSAC определяются матрицы гомографии;

4. как только мы получим приблизительную гомографию, нам нужно деформировать одно из изображений в общую плоскость;

5. работа по созданию панорамного кадра завершается выбором цветового пространства и установки метода цветокоррекции для нормализации интенсивности яркости панорамы.

Исследование создания панорамного теплового изображения проводилось с помощью «Интеллектуальной системы», разработанной на языке Python с помощью библиотеки OpenCv [3] в научной роте войск РЭБ ВС РФ. В качестве примера соединим изображения 1, 2, 3, которые были сняты беспилотным летательным аппаратом со встроенным тепловизором, в панораму.

Результат сшивания инфракрасных изображений в панорамное тепловое изображение представлен на рисунке 4.

	
<p>Рис. 1. Тепловое крайнее левое инфракрасное изображение городского объекта.</p>	<p>Рис. 2. Тепловое центральное инфракрасное изображение городского объекта.</p>
	
<p>Рис. 3. Тепловое крайнее правое инфракрасное изображение городского объекта.</p>	<p>Рис. 4. Результирующее тепловое инфракрасное изображение.</p>

Таким образом, в данной работе был разобран алгоритм создания панорамных тепловых инфракрасных изображений из последовательности перекрывающихся снимков сцены.

Список литературы

1. **Канаева И.А.** Создание панорамного видео / И.А. Канаева, Ю.А. Болотова. - Текст: электронный // Труды международной конференции по компьютерной графике и зрению «Графикон». - 2018. - № 28. - С. 432-435.

<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37157792> (дата обращения 29.09.2021) -
Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

2. **Чеховский Д.В.** Исследование процесса сшивания нескольких кадров в единое изображение / Д.В. Чеховский, М.Б. Цудиков, С.В. Балясный. - Текст: электронный // Известия тульского государственного университета. Технические науки. - 2013. - № 1. - С. 306-313.

<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20135535>(дата обращения 29.09.2021) -
Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

3. **Библиотека** обработки изображений OpenCV: [сайт].– 2020. URL:
<http://opencv.org> (дата обращения: 29.09.2021). -Текст: электронный.

Самойлов В.Д., Верещагин Д.Ю., Клонин И.П., Мерочкин А.С., Семисчастнов А.Е.

Samoilov V.D., Vereshchagin D.Y., Klonin I.P., Merochkin A.S., Semischastnov A.E.

Межвидовой центр подготовки и боевого применения войск радиоэлектронной борьбы (учебный и испытательный), г. Тамбов
Interspecific center of training and combat employment of troops of electronic warfare (training and testing), Tambov

Самойлов Вадим Дмитриевич – оператор научной роты; **Верещагин Дмитрий Юрьевич** – командир взвода научной роты, младший научный сотрудник роты (научной); **Клонин Илья Павлович** – оператор научной роты; **Мерочкин Алексей Сергеевич** – оператор научной роты; **Семисчастнов Андрей Евгеньевич** – оператор научной роты.

Samoilov Vadim Dmitryevych – operator of the scientific troop; **Vereshchagin Dmitry Yurievich** – platoon commander of a scientific troop, junior researcher of a troop (scientific); **Klonin Ilya Pavlovich** – operator of the scientific troop; **Merochkin Alexey Sergeevich** – operator of the scientific troop; **Semischastnov Andrey Evgenyevich** – operator of the scientific troop.

Определение характерных областей для объектов на изображениях в инфракрасном диапазоне

Determination of characteristic areas for objects in images in the infrared range

Ключевые слова: изображения в инфракрасном диапазоне, сегментация изображений.

Аннотация: Рассмотрен метод цветовой сегментации изображений в инфракрасном диапазоне.

Key words and phrases: infrared images, image segmentation.

Abstract: The method of color segmentation of images in the infrared range is considered.

Все природные и антропогенные объекты на поверхности Земли излучают тепловые инфракрасные волны, что обуславливает возможность дистанционной регистрации этого излучения и изучения тепловых свойств объектов.

Тепловизоры регистрируют собственное излучение объектов и преобразуют его в значения яркости изображения. При этом следует

отметить важную особенность изображений, полученных в тепловом инфракрасном диапазоне: они регистрируют не температуру объектов, а интенсивность теплового излучения. Снимки в инфракрасном диапазоне содержат информацию о температуре поверхности, которую практически невозможно получить каким-либо иным способом.

Одним из преимуществ съёмки в тепловом инфракрасном диапазоне является возможность обнаружения объектов за счёт различий в их излучаемой способности в отсутствии естественного освещения. Это свойство позволяет наблюдать предметы в полной темноте.

В текущий момент вопросы, связанные со сбором разведывательных данных, приобретают большое значение. В данной работе рассматривается метод определения области объектов на изображениях в инфракрасном диапазоне снятых в ночное время суток. Данный функционал будет полезен в ходе выполнения тактических задач, проводимых ночью, по определению местоположения скопления объектов, излучающих тепло.

Сегментация является подготовительным этапом для распознавания объектов. На этом этапе происходит группирование фрагментов изображения в область, принадлежащую одному объекту. При этом группирование осуществляется по различным признакам, таким как яркость, цвет, текстура.

Задача сегментации состоит в том, чтобы упростить или изменить вид изображения в нечто более значимое для анализа.

Результатом сегментации изображения является множество областей, которые в совокупности охватывают все изображение, или набор контуров, выделенных на изображении.

Выделение различных наборов сегментов на изображении в инфракрасном диапазоне осуществляется с помощью сравнения фонового изображения и переднего плана. Для этого сначала вычисляется среднее значение интенсивности на всем изображении [1]. Далее пиксели изображения в инфракрасном диапазоне сравниваются со средним значением

интенсивности. Все пиксели, обладающие низкой интенсивностью, выступают в качестве фона. Остальные пиксели оказываются объектными.

Для вычисления показателя оценки сегментации используется следующее выражение:

$$W = \frac{1}{N_{seg1}} \sum_{(x,y) \in seg1} U_{seg1}(x, y) + \frac{1}{N_{seg2}} \sum_{(x,y) \in seg2} U_{seg2}(x, y). \quad (1)$$

Далее определяется сумма квадратов разностей средних интенсивностей:

$$B = \left(\frac{1}{N_{seg1}} \sum_{(x,y) \in seg1} U_{seg1}(x, y) - \frac{1}{N_{seg2}} \sum_{(x,y) \in seg2} U_{seg2}(x, y) \right)^2. \quad (2)$$

Результирующее значение оценки сегментации вычисляется как:

$$F_{sep} = 1000 * W + B. \quad (3)$$

В качестве примера рассмотрим изображение 1. Сначала разбиваем исходное изображение на основе простого диапазона значений различных цветов, в результате получаем бинарную маску и накладываем на исходное изображение. Пропускаем эти операции определенное количество раз, в соответствии с количеством цветов на изображении, объединяем все бинарные маски и получаем конечный результат, который соответствует рисунку 3.

Исследование устранения дефектов на тепловом изображении проводилось с помощью «Интеллектуальной системы», разработанной на языке Python с помощью библиотеки OpenCv [2] в научной ротации войск РЭБ ВС РФ.



Рис. 1. – Исходное изображение.

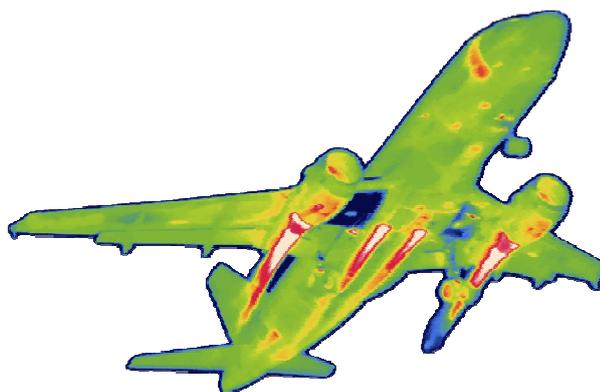


Рис. 2. – Область объекта, излучающего тепло.

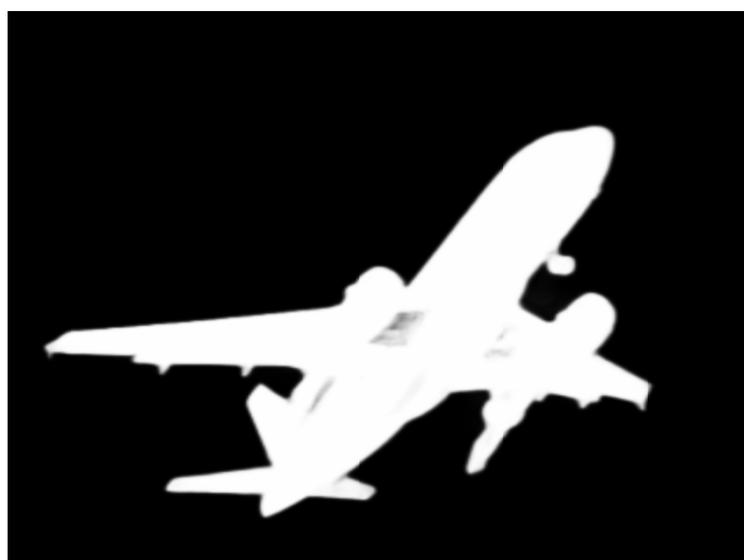


Рис. 3. – Результирующая маска изображения.

Рассмотренный метод определения областей объектов на изображении в инфракрасном диапазоне обеспечит возможность оперативного распознавания образов в процессе выполнения БПЛА тактических задач.

Список литературы

1. **Гонсалес Р.** Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс.– 3-е изд. исправ. и доп. - Москва: Техносфера, 2012. - 1104 с. - ISBN 978-5-94836-331-8. – Текст: непосредственный.

2. **Библиотека** обработки изображений OpenCV: [сайт].– 2020. URL: <http://opencv.org> (дата обращения: 29.09.2021). -Текст: электронный.

**Шатских В.В., Мерочкин А.С., Семисчастнов А.Е., Самойлов В.Д.,
Клонин И.П.**

**Shatskih V.V., Merochkin A.S., Semischastnov A.E., SamoiloV V.D.,
Klonin I.P.**

Межвидовой центр подготовки и боевого применения войск
радиоэлектронной борьбы (учебный и испытательный), г. Тамбов
Interspecific center of training and combat employment of troops of electronic
warfare (training and testing), Tambov

Шатских Виктор Васильевич – командир научной роты, старший научный сотрудник роты (научной); **Мерочкин Алексей Сергеевич** – оператор научной роты; **Семисчастнов Андрей Евгеньевич** – оператор научной роты; **Самойлов Вадим Дмитриевич** – оператор научной роты; **Клонин Илья Павлович** – оператор научной роты.

Shatskih Viktor Vasilevich – commander of a scientific troop, senior researcher of a troop (scientific); **Merochkin Alexey Sergeevich** – operator of the scientific troop; **Semischastnov Andrey Evgenyevich** – operator of the scientific troop; **Samoilov Vadim Dmitryevych** – operator of the scientific troop; **Klonin Ilya Pavlovich** – operator of the scientific troop.

Методы сравнения спектров температурно-временных зависимостей

Methods of comparing spectrum of temperature-time dependencies

Ключевые слова: нейронные сети; сигналы; температурно-временные зависимости; спектральный анализ.

Аннотация: Рассмотрены методы сравнения спектров температурно-временных зависимостей и взгляд на них с точки зрения цифровой обработки сигналов.

Key words: neural networks; signals; temperature-time dependencies; spectrum analysis

Abstract: In this article were considered methods of comparing spectrums of temperature-time dependences and a look at them from the point of view of digital signal processing.

Перед современной теплофизикой стоит множество разнообразных задач. Одной из таковых является задача сравнения зависимостей температуры от времени. Подобные зависимости получаются в ходе измерений различных объектов, от окружающего воздуха до камеры ядерного реактора. Кроме того многие физические величины зависят от температуры [1]. Сравнивая

зависимости, образующиеся в реальном времени, с зависимостями из некоторой накопленной базы данных, можно проводить анализ текущей ситуации и прогнозировать будущее развитие событий [2]. Подобное сравнение можно производить алгоритмически и при помощи нейронных сетей. В данной работе описывается обзор этих способов.

Зависимость температуры от времени можно сравнить с цифровым аудиосигналом, который является ничем иным, как зависимостью амплитуды от времени. Подобная схожесть позволяет применять к зависимостям температуры от времени методы цифровой обработки сигналов (ЦОС).

Аудиосигнал представляет из себя зависимость с определенной степенью дискретизации по времени и по амплитуде (квантованием). Дискретная единица времени аудиосигнала называется «сэмпл». В цифровом виде он представляется одним числом, характеризующими амплитуду. Основным приемом ЦОС является преобразование Фурье. Оно позволяет проводить анализ частотных показателей сигнала, которые могут дать больше информации о природе отраженных в сигнале явлений. После преобразования Фурье зависимость амплитуды (температуры) от времени преобразуется в зависимость амплитуды (температуры) от частоты, с которой они появляются в сигнале. Данная зависимость называется спектром [3]. В случае цифровых сигналов используется дискретное преобразование Фурье (ДПФ), пример результата которого (с нормализованной амплитудой) показан на рисунке 1, при этом частота дискретизирована. Дискретная единица частоты называется «бин», на рисунке 1 они имеют вид столбцов. Далее будет описываться сравнение именно спектров сигналов. В качестве сигналов при исследовании будут использованы аудиосигналы из-за их схожести с температурно-временными зависимостями и высокого разнообразия.

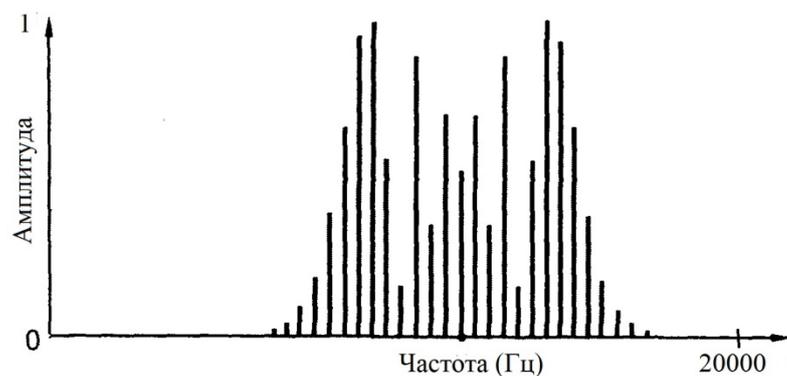


Рис. 1 – Пример спектра, получившегося в результате ДПФ.

Исследование методов сравнения спектров сигналов, описанное в работе, проводилось на базе программы «SDRPro», разработанной операторами научной роты войск радиоэлектронной борьбы. «SDRPro» проводит радиомониторинг, и сравнивает входящий сигнал с сигналами из имеющейся базы данных.

Сравнение сигналов в «SDRPro» может происходить двумя способами. Первый способ - при помощи алгоритма. В ходе него программа для входящего сигнала и для каждого сигнала из базы данных:

1. Извлекает из разных равно распределенных частей сигнала N выборок, по M сэмплов, идущих друг за другом. Для N и M опытным путем были подобраны оптимальные значения 10 и 16 соответственно.

2. Каждая выборка проходит дискретное преобразование Фурье, организованное при помощи библиотеки *fftw*, в результате чего преобразуется в $M/2$ частотных бинов.

3. Частотные бины в каждой выборке нормируются с максимальным значением L и округляются. Значение L характеризует степень схожести сигналов, которые алгоритм посчитает таковыми. В случае «SDRPro» оптимальным был принят коэффициент равный 100.

Далее между собой сравниваются выборки из полученного сигнала с выборками каждого из базы данных. При совпадении $M/2$ бинов в

сравниваемых выборках, к счетчику похожести соответствующего сигнала из базы данных прибавляется единица. В дальнейшем наиболее похожим признается тот сигнал, у которого значение этого счетчика максимально.

Второй способ – при помощи нейронных сетей (НС). На данный моментони активно применяются в задачах классификации и распознавания образов. Есть множество различных архитектур НС, в «SDRPro» используется одна из наиболее универсальных и простых - однонапрвленная многослойная сеть, созданная при помощи библиотеки *FANN*. Нейронная сеть в «SDRPro» насчитывает 3 слоя: входной, промежуточный и выходной. На вход НС подается несколько выборок, прошедших преобразование Фурье (процесс их получения описан выше). Из-за этого вход нейронной сети должен насчитывать количество нейронов, равное $M*N/2$. Выходной слой должен насчитывать столько нейронов, сколько сигналов в базе данных. Чем больше численное значение выходного нейрона, тем больше схожесть входного сигнала с определенным сигналом из базы данных. Промежуточный слой насчитывает столько же нейронов, сколько и выходной. В «SDRPro» используется заранее обученная нейронная сеть. Обучение происходит при помощи отдельной программы на выборках из сигналов в базе данных.

В рамках исследования был проведен анализ быстродействия описанных выше алгоритмов. Обученная нейронная сеть распознает сигнал за 398 миллисекунд, а алгоритм за 9432 миллисекунды.

Оба описанных выше способа сравнения сигналов подходят для применения при сопоставлении спектров различных температурно-временных зависимостей и имеют возможность оптимизации. Выбор наиболее оптимального способа зависит от требуемой точности времени вычислений.

Список литературы

1. **Герашенко О.А.**, Федоров В.Г. Тепловые и температурные измерения. Справочное руководство / Киев: Наукова думка, 1965.– 304 с.
2. **Афанасьев В.Н.** Анализ временных рядов и прогнозирование: Учебник / В.Н. Афанасьев, М.М. Юзбашев.– М.: Финансы и статистика, Инфра-М, 2012 .– 320 с.
3. **Бойко Б.П.**, Тюрин В.А. Спектр сигнала: учебно-методическое пособие / Б.П. Бойко, В.А. Тюрин. – Казань: Казанский федеральный университет, 2014 .– 38 с.

**Клонин И.П., Верещагин Д.Ю., Самойлов В.Д., Мерочкин А.С.,
Семисчастнов А.Е.**

**Klonin I.P., Vereshchagin D.Y., Samoilov V.D., Merochkin A.S.,
Semischastnov A.E.**

Межвидовой центр подготовки и боевого применения войск
радиоэлектронной борьбы (учебный и испытательный), г. Тамбов
Interspecific center of training and combat employment of troops of electronic
warfare (training and testing), Tambov

Клонин Илья Павлович – оператор научной роты; **Верещагин Дмитрий Юрьевич** – командир взвода научной роты, младший научный сотрудник роты (научной); **Самойлов Вадим Дмитриевич** – оператор научной роты; **Мерочкин Алексей Сергеевич** – оператор научной роты; **Семисчастнов Андрей Евгеньевич** – оператор научной роты.

Klonin Ilya Pavlovich – operator of the scientific troop; **Vereshchagin Dmitry Yurievich** – platoon commander of a scientific troop, junior researcher of a troop (scientific); **Samoilov Vadim Dmitryevych** – operator of the scientific troop; **Merochkin Alexey Sergeevich** – operator of the scientific troop; **Semischastnov Andrey Evgenyevich** – operator of the scientific troop.

**Применение генераторов хаотических колебаний для организаций
воздействий на информационные каналы мехатронных систем**

**Application of generators of chaotic vibrations for organizations acting on
information channels of mechatronic systems**

Ключевые слова: хаотические колебания; радиосвязь; сигнал; помеха; теплофизические измерения.

Аннотация: В работе рассматривается подавление сигналов в каналах информационных систем для теплофизических измерений, путем постановки помех, создаваемых генераторами хаотических колебаний.

Key words: chaotic fluctuations; radio communication; signal; hindrance; thermophysical measurements.

Abstract: The paper deals with the suppression of signals in the channels of information systems for thermophysical measurements by jamming generated by generators of chaotic oscillations.

На сегодняшний день большое развитие в области передачи данных получили беспроводные сети — сети радиосвязи. Все больше информационно сенсорных систем для теплофизических исследований

включают в себя функцию беспроводного соединения. Современное здание включает элементы постоянного контроля обстановки такие как терморегистраторы, логгеры. Для автоматизации процесса контроля и регулировки, подобные электронные устройства входят в систему автоматического контроля, работающую по беспроводному принципу. То есть сигнал от датчиков поступает на центральный контроллер, который принимает информацию от датчиков и посылает управляющие сигналы.

Мобильность пользователей, отсутствие необходимости монтажа кабельной системы, простота подключения пользовательских устройств - все эти факторы обеспечивают удобство в использовании. Слабым местом таких сетей является канал связи, так как осуществляет передачу данных через радиозфир и является открытой средой, доступной для прослушивания третьей стороной. Данная проблема решается шифрованием, однако это применимо не всегда и в любом случае не исключает возможности перехвата и подавления сигнала.

Исследование применения хаотических колебаний на каналы сенсорных систем для теплофизических измерений проводилось на базе программы «Айсберг 2.0», разработанной операторами научной роты войск радиоэлектронной борьбы.

«Айсберг 2.0» представляет собой набор генераторов хаотических колебаний, сигналы от которых поступают на блок коммутации сигналов. На нем происходит суммирование входных сигналов и вывод каждого из сигналов на определенное время, таким образом, получается последовательность хаотических сигналов, идущих друг за другом. Последовательность, а также их длительность задается либо случайным образом, либо определенным заранее алгоритмом. На рисунке 1 показана схема устройства генератора.

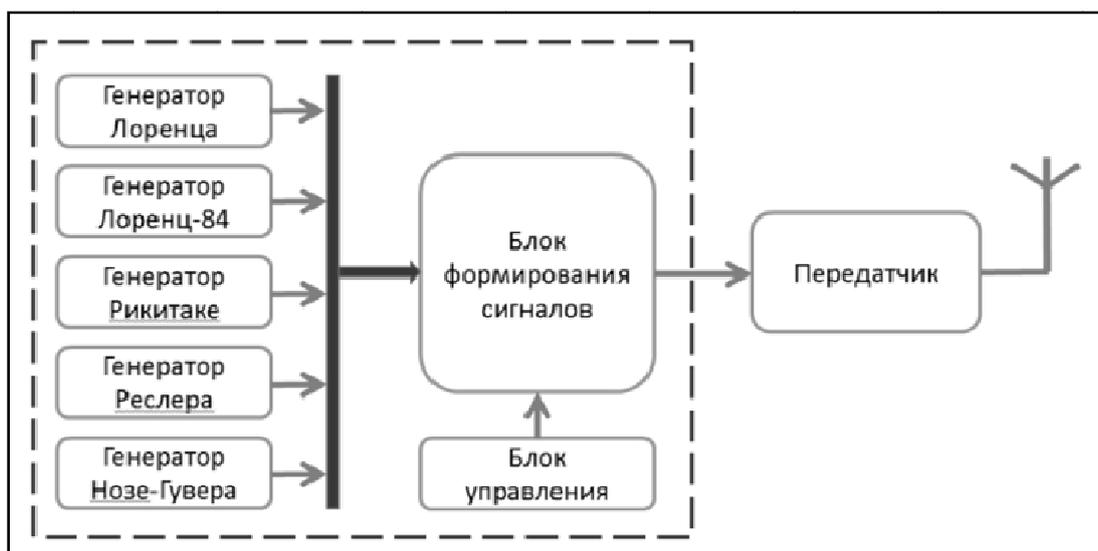


Рис. 1 - Структурная схема устройства генератора.

Есть возможность выдавать либо каждый из сигналов от генераторов по отдельности, либо задавать выходной сигнал как комбинацию сигналов от генераторов.

Постановка помехового сигнала происходит путем реализации динамического хаоса. Динамический хаос – непериодические колебания, возникающие в нелинейных детерминированных системах, обладающие высокой чувствительностью к начальным условиям [1].

Аттрактор Лоренца – популярный и хорошо изученный пример хаотического аттрактора в системе трех дифференциальных уравнений первого порядка. Он был получена в ходе экспериментов для задачи о моделировании конвекции жидкости [2]. Лоренц сделал ряд допущений и получил трехмерную модель тепловой конвекции в обыкновенных дифференциальных уравнениях (1).

$$\begin{cases} \dot{x} = a(y - x) \\ \dot{y} = x(b - z) - y. \\ \dot{z} = xy - cz \end{cases} \quad (1)$$

Параметры «а», «b» и «с» задают вид движения точки в фазовом пространстве. При значениях параметров $a=10$, $b>1$ и $c=\frac{8}{3}$ возникают хаотические колебания.

На рисунке 2 изображена фазовая траектория модели при заданных параметрах.

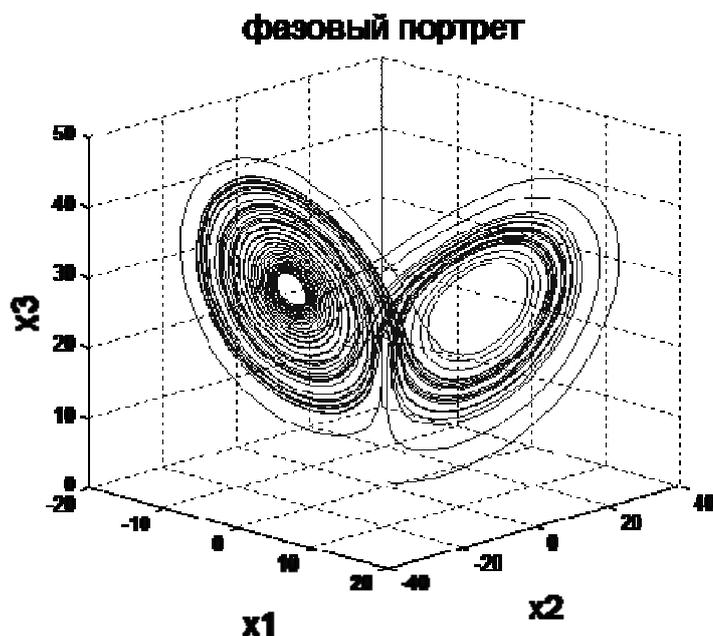


Рис. 2 - Движение системы в фазовом пространстве.

По рисунку видно, что имеется две точки притяжения. У данной траектории имеется несколько особенностей. Каждая из точек равновесия не является притягивающей, однако при незначительном изменении начальных условий процесс также будет сосредоточен вокруг этих точек, но его траектории будут существенно отличаться от предыдущего варианта [3].

Генерируемая таким образом помеха используется для подавления сигналов на каналы сенсорных систем для теплофизических измерений. Её сложная структура затрудняет процесс фильтрации сигнала, позволяя гарантированно нарушить работу целевого устройства.

Список литературы

1. **Бендат Дж.** Измерение и анализ случайных процессов / Дж. Бенжат, Ф. Пирсол / пер. с англ. Г.В. Матушевского, В.Е. Привальского //«МИР» – 1971. – 408 с.

2. **Кузнецов С.П.** Простые электронные генераторы хаоса и их схемотехническое моделирование / Кузнецов, С.П. // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика – 2018. – 41 с.

3. **Шахтарин Б.И.** и др. Генераторы хаотических колебаний: Учебное пособие / Б.И. Шахтарин, Ю.А. Сидоркина, А.В. Кондратьев, С.В. Митин // Гелиос АРВ – 2007. – 248 с.

**Мерочкин А.С., Болдырев А.В., Семисчастнов А.Е., Самойлов В.Д.,
Клонин И.П.**

**Merochkin A.S., Boldyrev A.V., Semischastnov A.E., Samoilov V.D.,
Klonin I.P.**

Межвидовой центр подготовки и боевого применения войск
радиоэлектронной борьбы (учебный и испытательный), г. Тамбов
Interspecific center of training and combat employment of troops of electronic
warfare (training and testing), Tambov

Мерочкин Алексей Сергеевич – оператор научной роты; **Болдырев Алексей Васильевич** – командир взвода научной роты, младший научный сотрудник роты (научной); **Семисчастнов Андрей Евгеньевич** – оператор научной роты; **Самойлов Вадим Дмитриевич** – оператор научной роты; **Клонин Илья Павлович** – оператор научной роты.

Merochkin Alexey Sergeevich – operator of the scientific troop; **Boldyrev Alexey Vasilievich** – platoon commander of a scientific troop, junior researcher of a troop (scientific); **Semischastnov Andrey Evgenyevich** – operator of the scientific troop; **Samoilov Vadim Dmitryevych** – operator of the scientific troop; **Klonin Ilya Pavlovich** – operator of the scientific troop.

Применение технологии адаптивной фильтрации в информационных каналах мехатронных систем

Application of adaptive filtering technology in information channels of mechatronic systems

Ключевые слова: сигнал, измерения, адаптивная фильтрация, помехи, алгоритм.

Аннотация: В работе рассматриваются три метода адаптивной фильтрации: метод наименьших квадратов, его нормированная версия и рекурсивный метод по критерию наименьших квадратов. Проведен анализ полученных данных и выявлены способы применения выбранных алгоритмов в системах измерения.

Key words: signal, measurements, adaptive filtering, interference, algorithm.

Abstract: The paper considers three adaptive filtering methods: the least squares method, its normalized version, and the recursive least squares method. The analysis of the data obtained is carried out and the ways of applying the selected algorithms to measurement systems are revealed.

Современные электронные системы измерения, как правило, состоят из измеряющего датчика, линии передачи данных и устройства обработки

сигнала. Сигнал с датчика во время его прохождения по линии передачи данных может быть искажен из-за внешних факторов. Это ярко выражено на промышленных предприятиях, где много мощных источников электромагнитного шумового излучения. Искажения сигнала, поступившего, например, с датчика измерения температуры на подобных объектах могут привести к ситуациям с тяжелыми последствиями. Для предотвращения этого на данный момент используются цифровые фильтры, но из-за усложнения современных устройств-излучателей шумовых сигналов они все реже справляются со своей задачей. Данная проблема может быть решена средством применения технологии адаптивной фильтрации, сравнительный анализ методов которой приведен в данной работе.

Адаптивный фильтр – это фильтр с изменяемыми в процессе работы параметрами, набор которых зависит от критерия работы адаптивного фильтра [1]. Этим критерием часто является достижение минимума целевой функции. Достижение минимума целевой функции означает, что выходной сигнал адаптивного фильтра повторяет по форме требуемый. Общий вид процесса адаптивной фильтрации показан на рисунке 1.

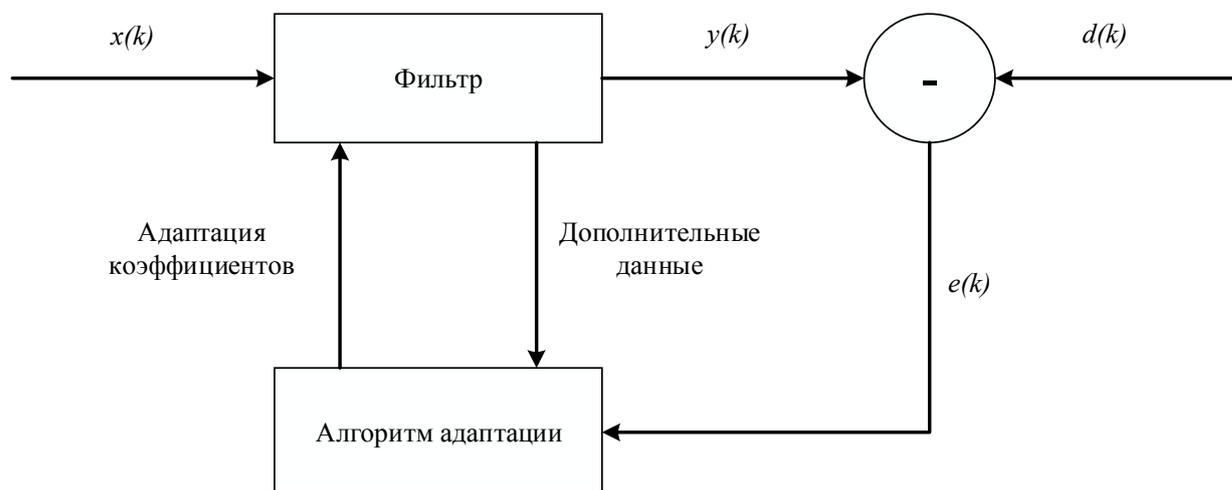


Рис. 1 - Общий вид процесса адаптивной фильтрации.

Используются следующие обозначения: $x(k)$ – входной сигнал; $y(k)$ – выходной сигнал; $d(k)$ – образцовый сигнал; $e(k)$ – сигнал ошибки. Алгоритм

адаптации подстраивает коэффициенты фильтра, минимизируя сигнал ошибки. Представим математическую модель алгоритма адаптации. Пусть имеется дискретный фильтр порядка N с коэффициентами $\{w_n\}$, $n = 0, 1, \dots, N$.

Сигнал ошибки имеет вид:

$$e(k) = d(k) - y(k) = d(k) - \sum_{n=0}^N w_n x(k-n). \quad (2)$$

Задача оптимальной в статистическом смысле фильтрации заключается в минимизации среднего квадрата ошибки.

Дисперсия определяется как:

$$J(\{w_n\}) = \overline{e^2(k)} = \overline{d^2(k)} - 2 \times \overline{(d(k) \times x(k))^T} \times w + w^T \times \overline{x(k) \times x^T(k)} \times w = \sigma_d^2 - 2 \times p^T \times w + w^T \times R \times w \quad (3)$$

где $\sigma_d^2 = \overline{d^2(k)}$ – средний квадрат требуемого сигнала на k -ом шаге, который не зависит от коэффициентов фильтра, $p = \overline{d(k) \times x(k)}$ – вектор-столбец взаимных корреляций между k -м отсчетом требуемого сигнала и входным сигналом, $R = \overline{x(k) \times x^T(k)}$ – корреляционная матрица входного сигнала.

Если матрица R невырожденная, то дисперсия имеет единственный минимум, при решении уравнения. Решение представляет собой вектор-столбец:

$$w = R^{-1} \times p, \quad (5)$$

где R^{-1} – обратная корреляционная матрица.

Описанный фильтр называется фильтром Винера. Он имеет минимальную дисперсию сигнала ошибки.

Главной задачей фильтрации является достижение минимума среднего значения квадрата сигнала ошибки в процессе решения уравнения (3). В адаптивных фильтрах коэффициенты вектора w изменяются на каждом шаге [2].

Метод наименьших квадратов (*LMS*) оперирует мгновенными значениями матрицы R входного сигнала и вектора p входного и требуемого сигналов.

Математическое ожидание коэффициентов фильтра LMS , при $k \rightarrow \infty$ стремятся к значениям коэффициентов фильтра Винера (5).

Нормированная версия метода наименьших квадратов ($NLMS$) отличается тем, что коэффициент μ рассчитывается на каждом шаге, исходя из энергии сигнала, содержащемся в линии задержки.

В общем виде для алгоритма RLS на каждом k -ом шаге выполняются: фильтрация сигнала; вычисление ошибки; расчет вектора-столбца коэффициентов усиления; обновление оценки обратной корреляционной матрицы; обновление коэффициентов фильтра.

В зависимости от характеристик линии передачи информации предпочтительным может оказаться тот или иной алгоритм. При их сравнении учитываются следующие параметры: сходимость, степень подавления помех, вычислительная сложность [2, 3]. В таблице 1 приведено сравнение трех алгоритмов по перечисленным характеристикам.

Таблица 1 – Сравнительная таблица алгоритмов адаптивной фильтрации.

Алгоритм	Скорость сходимости	Подавление, дБ	Вычислительная сложность
LMS	средняя	51-63,53	$O(N)$
$NLMS$	низкая	49-59,46	$O(N)$
$RLS (MIL, QR)$	высокая	55,29-66	$O(N^2)$

Внедрение алгоритмов адаптивной фильтрации сигналов в разрабатываемые системы измерения позволит производить автоматическую настройку фильтрации и обеспечить эффективную обработку сигналов.

Список литературы

1. **Джиган В.И.** Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы / В.И. Джиган. – М.: Техносфера, 2013. – 528 с.
2. **Акиншин Н.С., Петешов А.В., Румянцев В.Л., Хомяков К.А.** Адаптивные алгоритмы оптимальной фильтрации сигнала / Н.С. Акиншин, А.В. Петешов, В.Л. Румянцев, К.А. Хомяков. – Тула: Известия ТулГУ. Технические науки, 2018. – 69 с.
3. **Ткачев Г.Н., Готовчиц И.В., Крылов Б.Н.** Результаты наблюдения эхосигналов от самолетов в поле подсвета удаленного передатчика КВ-диапазона. Труды XVI Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». – 2010. – С. 2221-2230.

**Семисчастнов А.Е., Болдырев А.В., Мерочкин А.С., Самойлов В.Д.,
Клонин И.П.**

**Semischastnov A.E., Boldyrev A.V., Merochkin A.S., SamoiloV V.D.,
Klonin I.P.**

Межвидовой центр подготовки и боевого применения войск
радиоэлектронной борьбы (учебный и испытательный), г. Тамбов
Interspecific center of training and combat employment of troops of electronic
warfare (training and testing), Tambov

Семисчастнов Андрей Евгеньевич – оператор научной роты; **Болдырев Алексей Васильевич** – командир взвода научной роты, младший научный сотрудник роты (научной); **Мерочкин Алексей Сергеевич** – оператор научной роты; **Самойлов Вадим Дмитриевич** – оператор научной роты; **Клонин Илья Павлович** – оператор научной роты.

Semischastnov Andrey Evgenyevich – operator of the scientific troop; **Boldyrev Alexey Vasilievich** – platoon commander of a scientific troop, junior researcher of a troop (scientific); **Merochkin Alexey Sergeevich** – operator of the scientific troop; **Samoilov Vadim Dmitryevych** – operator of the scientific troop; **Klonin Ilya Pavlovich** – operator of the scientific troop.

Оценка безопасности информационных каналов при управлении мехатронными системами

Assessment of the security of information channels in the management of mechatronic systems

Ключевые слова: уязвимость; атака; мехатронная система; температура; измерение температуры.

Аннотация: Рассмотрена безопасность информационных каналов при управлении мехатронными системами.

Key words: vulnerability; attack; mechatronic system; temperature; temperature measurement.

Abstract: The safety of information channels in the control of mechatronic systems is considered.

Качество функционирования автоматизированных систем управления во многом определяется работой уровня получения первичной информации – работой средств измерений. При управлении крупными технологическими объектами измеряется большое количество параметров, основными из

которых являются температура, давление, расход. В данной работе рассматриваются устройства измерения температуры, так как в настоящее время появилось много вариантов реализации регистраторов для частного и коммерческого пользования, которые подвергались кибер воздействию.

Для измерения технологических параметров существует большое количество средств измерений, основанных на различных физических явлениях.

Каждый метод измерения температуры имеет свои особенности, определяемые как принципом, так и применяемыми средствами и схемами их подключения [1].

В настоящее время все большую популярность набирают: тепловизоры, термометры, измерители тепловых потоков, пирометры, логгеры данных, измерители теплопроводности и термоэтикетки. Данные мехатронные системы относятся к классу умных устройств (интернет вещи) для мониторинга температуры или температуры и влажности.

Рассмотрим одно из таких устройств. Логгер – это контрольно-измерительный прибор, предназначенный для регистрации определенных параметров с заданной периодичностью и их записи во внутреннюю память прибора или передачи информации пользователю.

Логгеры используются во многих отраслях, за счет своей мобильности и имея постоянный доступ к измерительным данным с помощью сети интернет. Данные устройства не обладают хорошей защитой от атак и имеют уязвимости. Способом защиты является сегментация сети с изоляцией небезопасных умных устройств, а также определение уязвимостей с помощью сканеров сетевой безопасности.

Атакой называется организация специальных программных воздействий. Источник атаки – программа (оператор), ведущая атаку и осуществляющая непосредственное воздействие [2].

Атаки подразделяются на семь классов: отказ в обслуживании (*Denial of Service*), утечка информации, нарушение прав доступа к файлу, дезинформация, получение доступа к специальным файлам и базам данных, удалённое выполнение программ, расширение прав [3].

Кроме того, атаки могут быть внутренними (имеется физический доступ к атакуемому компьютеру), внешними из глобальной сети и внешними из локальной сети.

Отдельно стоит выделить внешние атаки из локальной сети. Они являются одними из самых опасных. Атакующий, получив доступ к одному из устройств атакуемой сети либо подключившись к ней, может с лёгкостью отслеживать информацию, отправляемую на устройство пользователя, также позволяет использовать в качестве опорной точки для заражения других устройств, подключенных к той же сети и перехватывать любые незашифрованные сообщения, передаваемые по сети, в том числе и идентификационные данные тех или иных сервисов.

Сетевые сканеры направлены на решение следующих задач: идентификация и анализ уязвимостей, инвентаризация ресурсов (таких как операционная система, программное обеспечение и устройства сети) и формирование отчётов, которые содержат описание уязвимостей и варианты их устранения.

Сканер локальной сети – средство, чья деятельность связана с хранением и обработкой уникальных баз данных, конфиденциальной информации, ценных архивов. Сканеры сети необходимы организациям в различных сферах обороны, науки, медицины, торговли, ИТ, финансов, производства, для органов власти и диспетчерских служб – словом, везде, где нежелательна или даже опасна утечка накопленной информации, имеются базы персональных данных клиентов [4].

Сканеры уязвимостей сети используют два основных механизма. Первый – это механизм активного анализа, который с помощью имитации атак помогает подтвердить наличие уязвимости и обнаружить ранее не выявленные «провалы». Второй – это механизм пассивного анализа. Сканер ищет уязвимость без подтверждения её наличия, используя косвенные признаки.

В данной работе для поиска уязвимостей устройств предлагается использовать программный комплекс «Бастион», разрабатываемый операторами научной роты войск радиоэлектронной борьбы ВС РФ. В отличие от существующих сканеров сетевой безопасности, программный комплекс «Бастион» имеет следующие преимущества:

- высокая скорость проверки доступности и сканирование портов;
- отсутствие недекларированных возможностей и программных закладок в разрабатываемом программном комплексе;
- определение местоположения устройств по результатам сканирования;
- обнаружение скрытых точек доступа и абонентских терминалов беспроводных сетей, подключённых к ним;
- подбор *WEP*, *WPA-PSK* ключей аутентификации беспроводных сетей стандарта 802.11;
- определение уязвимостей программного и аппаратного обеспечения сканируемого объекта.

Комплекс «Бастион» имеет модульную архитектуру, которые разделены на несколько групп: модули анализа проводных и беспроводных сетей устройств (взаимодействие с сетью), модули обнаружения и эксплуатации уязвимостей программного обеспечения и модули взаимодействия с базами данных.

Разработанный программный комплекс используется для анализа информационной инфраструктуры устройств, что позволяет эффективно определять уязвимости.

Список литературы

1. **Кузнецов Н.Д.** Сборник задач и вопросов по теплотехническим измерениям и приборам / Н.Д. Кузнецов, В.С. Чистяков. – 2-е изд., доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 328 с.
2. **Бабин С.А.** Инструментарий хакера / С.А. Бабин. – СПб.: БХВ-Петербург, 2014. – 240 с.
3. **Weidman G.** Penetration testing: a hands-on introduction to hacking / G. Weidman – No Starch Press, 2014. – 531 с.
4. **Бабин С.А.** Лаборатория хакера / С.А. Бабин. – СПб.: БХВ-Петербург, 2016. – 240 с.

Лосев Г.Л., Колесниченко И.В., Мамыкин А.Д.
Losev G.L., Kolesnichenko I.V., Mamykin A.D.

Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской
академии наук, г. Пермь
Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of Russian
Academy of Science, Perm

Лосев Геннадий Леонидович – младший научный сотрудник лаборатории Технологической гидродинамики; **Колесниченко Илья Владимирович** – к.ф.-м.н., заведующий лабораторией Технологической гидродинамики, **Мамыкин Андрей Дмитриевич** – к.ф.-м.н., научный сотрудник лаборатории Физической гидродинамики.

Losev Gennady Leonidovich – junior researcher, laboratory of Technological Hydrodynamics; **Kolesnichenko Ilya Vladimirovich** – candidate of physical and mathematical Sciences, head of the laboratory of Technological Hydrodynamics, **Mamykin Andrey Dmitrievich** – candidate of physical and mathematical Sciences, researcher, laboratory of Physical Hydrodynamics.

Определение формы кристаллической фазы при направленной кристаллизации ультразвуковым методом

Localization of the shape of the solid phase during directional crystallization by the ultrasonic method

Ключевые слова: методология эксперимента, направленная кристаллизация, ультразвук, физический эксперимент.

Аннотация: Разработан метод ультразвукового определения формы фронта кристаллизации.

Key words: directional crystallization, experimental methodology, physical experiment, ultrasound.

Abstract: A method for ultrasonic determination of the crystallization front shape has been developed.

Технология направленной кристаллизации нашла применение, как в металлургии, так и в области выращивания полупроводниковых кристаллов.

Наличие значительных градиентов температуры, связанных с особенностями технологического процесса, приводит к возникновению в расплаве тепловой конвекции. Возникающие течения могут изменять

параметры тепломассопереноса в жидкости и, вследствие этого, исказить форму кристаллической фазы.

Одним из способов решения данной проблемы является создание в объёме жидкости дополнительных течений, нивелирующих негативное влияние тепловой конвекции.

Для отработки существующих и развития новых технологий управления формой кристаллической фаз, весьма важно иметь возможность не только численно, но и экспериментально моделировать протекающие процессы в силу комплексного характера течений, возникающих в расплавах металлов и полупроводников. Одним из ключевых факторов экспериментального моделирования является методология измерений.

Мы предлагаем метод экспериментальной регистрации формы фронта кристаллизации при направленном затвердевании жидких металлов основанный на анализе ультразвукового эха. Предложенная методика была успешно применена к задаче сглаживания фронта кристаллизации сплава на основе галлия в условиях модулированного электромагнитного перемешивания.

Экспериментальная установка содержит узкий плексигласовый канал, заполненный легкоплавким галлиевым сплавом $\text{Ga}_{86.3}\text{Zn}_{10.8}\text{Sn}_{2.9}$ (вес. %). Канал расположен над линейным индукционным перемешивателем бегущего магнитного поля. Вблизи узких торцов канала и внутри его установлены медные теплообменники, через которые прокачивается тосол заданной температуры. Задача данных теплообменников – создание условий направленной кристаллизации. Измерение скорости жидкого металла, а также положения и формы кристаллической фазы проводилось при помощи ультразвукового доплеровского анемометра. Принцип его работы основывается на излучении ультразвукового луча, фиксации отраженного эхо и определении сдвига частот между излученным и отраженным сигналами.

Анализ отраженного эхо-сигнала позволяет определить положение границы раздела фаз: при переходе между различными фазами изменяется

акустическое сопротивление среды (произведение плотности на скорость звука). Скачок акустического сопротивления выражается в виде пика в профиле ультразвукового эха. Положение этого пика на координатной оси соответствует положению межфазной границы. При размещении нескольких датчиков вдоль фронта кристаллизации, возможно восстановить форму фронта.

Описанный метод был применен при решении задачи о сглаживании фронта кристаллизации посредством низкочастотных модуляций бегущего магнитного поля. Были найдены профили кристаллической фазы для различных режимов перемешивания. Установлены режимы, отвечающие максимальному сглаживанию фронта кристаллизации.

Работа выполнена при поддержке гранта президента № МК-5936.2021.1.2.

Романова М.А.
Romanova M.A.

ФГБУН Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова
Российской академии наук, г. Москва
V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of
Sciences, Moscow

Романова Мария Андреевна – научный сотрудник лаборатории "Киберфизических систем".

Romanova Mariya Andreevna – Researcher in the Cyberphysical Systems Laboratory.

Исследование тепловых режимов светодиодных модулей

Study of thermal modes of LED modules

Ключевые слова: светодиоды, светодиодные модули, тепловые поля, коррелированная цветовая температура.

Аннотация: Рассмотрено влияние тепловых режимов на коррелированную цветовую температуру светодиодных модулей в зависимости от времени.

Key words: LEDs, LED modules, thermal fields, correlated color temperature.

Abstract: The influence of thermal modes on the correlated color temperature of LED modules as a function of time.

Срок службы светодиодных модулей зависит от многих факторов, как от характеристик драйвера питания, так и от условий эксплуатации. В свою очередь, технические характеристики светодиодных модулей тесно связаны с тепловыми режимами. Несоблюдение рекомендуемого теплового режима приводит к уменьшению срока службы модуля и влечет за собой ухудшение световых характеристик [1]. Это легко проследить, по спектральным характеристикам в зависимости от температуры. Известно, что интенсивность излучения изменяется по экспоненциальному закону:

$$I(h\nu) \sim \sqrt{h\nu - \Delta E_g} \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right) \quad (1)$$

где $I(h\nu)$ – интенсивность излучения; h – постоянная Планка; ν – частота

колебаний фотонов; ΔE_g – ширина запрещенной зоны; k – постоянная Больцмана; T – температура. Перечисленные параметры зависят от температуры и вносят свой вклад в форму и ширину спектра излучения [2] и соответственно оказывают влияние на другие световые характеристики светодиодных модулей.

Для проведения исследования тепловых режимов были выбраны три светодиодных модуля, которые имеют одинаковые электрические и оптические параметры, но конструктивно располагаются на печатных платах с различными коэффициентами теплопроводности – 1, 3 и 8 Вт/мК. Перед экспериментальной частью был проведен теоретический расчет и построена модель теплового нагрева светодиодного модуля на радиаторе с горизонтально-ориентированными ребрами охлаждения в программной среде COMSOL Multiphysics. Для теоретического расчета составлена электротепловая схема замещения с использованием светодиода Lumileds 5050. Расчет показал, что в конфигурации с любой из трёх плат на радиаторе, температура p - n перехода не поднимается выше $t_{p-n} = 76$ °С при максимально допустимой температуре p - n перехода $t_{p-n} = 110$ °С. А для процесса моделирования были построены геометрические модели всех элементов, в среде COMSOL Multiphysics. Так как программа решает дифференциальные уравнения, поэтому заданы граничные условия через наложение сетки на геометрическую модель светодиодного модуля.

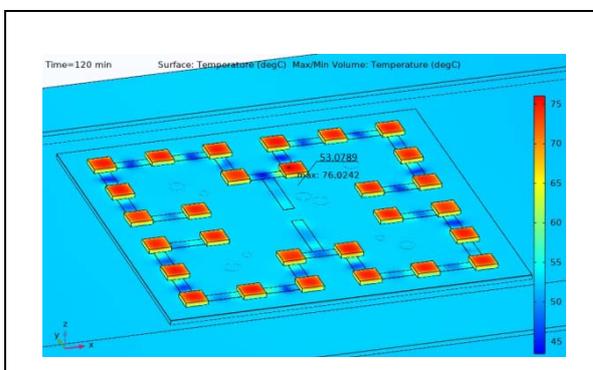


Рис. 1. Термический расчет в момент времени $t = 120$ мин.

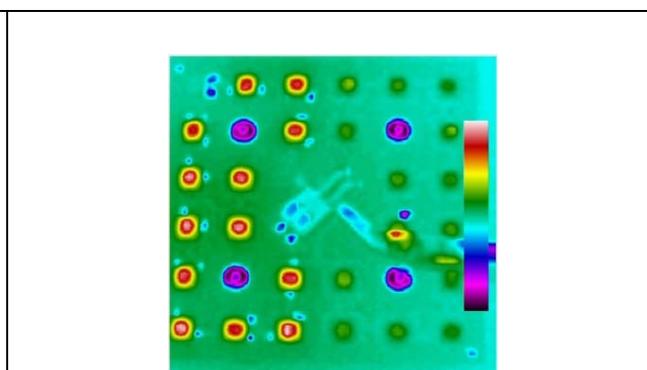


Рис. 2. Снимок экрана тепловизора в момент времени $t = 120$ мин работы модуля с коэффициентом теплопроводности 8 Вт/мК.

На рисунке 1 представлен результат теплового расчета в среде COMSOL Multiphysics в момент времени $t=120$ минуты. Для сопоставления смоделированного пространственного распределения радиационных температур с лабораторным экспериментом на рисунке 2 представлен снимок экрана тепловизора после 120 минут работы светодиодного модуля. Так же на рисунке 1 приводится значение температуры в точке, соответствующей точке замера щупом термопары. Расчетное значение температуры в данной точке составило $T \approx 53 \text{ }^\circ\text{C}$, что является незначительным отклонением от экспериментальных данных: замер щупом термопары составил $T \approx 56 \text{ }^\circ\text{C}$.

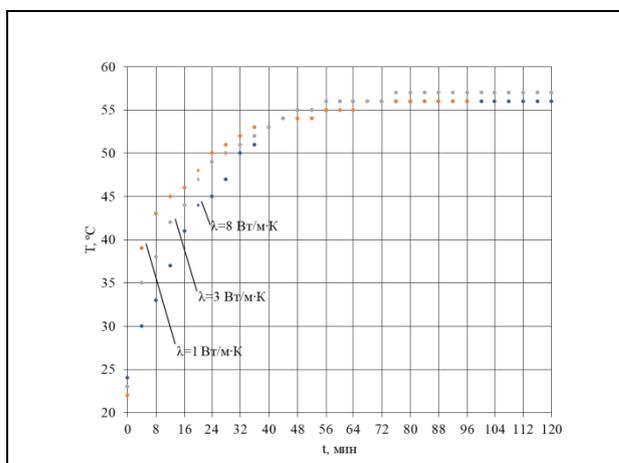


Рис. 3. Графики зависимости температуры светодиодных модулей от времени эксперимента.

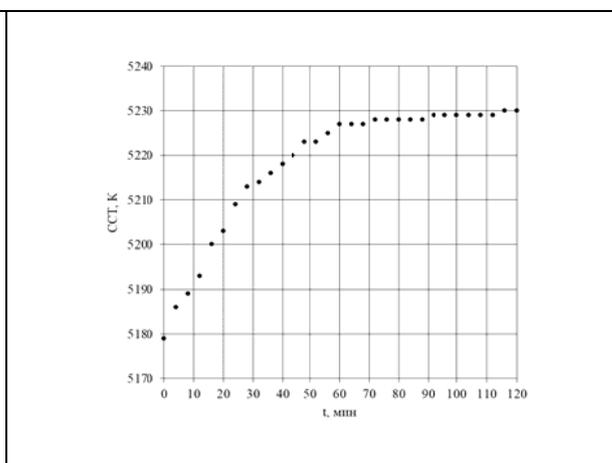


Рис. 4. График зависимости цветовой коррелированной температуры от времени.

Две другие платы аналогичны первой и отличаются только коэффициентом теплопроводности, поэтому приведем график сравнения скорости нагрева трех плат. На рисунке 3 представлены графики зависимости температуры, снятой термопарой, для трех плат. Можно сделать вывод, что чем больше у печатной платы коэффициент теплопроводности, тем меньше её тепловое сопротивление, и, соответственно, её нагрев будет происходить медленнее, чем у плат с меньшим коэффициентом теплопроводности.

За время эксперимента на радиаторе с горизонтально-ориентированными ребрами охлаждения все светодиодные модули нагрелись до температуры $T \approx 57 \text{ }^\circ\text{C}$. После первого часа работы при максимальном токе все три платы вышли на рабочий режим, при котором температура не увеличивалась.

Было установлено, что результат расчета и моделирования имеют разницу не более чем в 2-3 градуса по Цельсию, что говорит о правильности готовой тепловой модели. А в процессе моделирования установлено, что за два часа эксперимента плата нагрелась до температуры $T \approx 53 \text{ }^\circ\text{C}$, что является незначительным отклонением от экспериментальных данных, где температура составила $T = 56 \text{ }^\circ\text{C}$. В свою очередь, температура кристалла составила $T = 76 \text{ }^\circ\text{C}$, что согласуется с теоретическим расчетом, при котором температура радиатора составляла $T = 60 \text{ }^\circ\text{C}$.

Также за всё время эксперимента коррелированная цветовая температура, замеряемая спектрофотометром, у трех модулей выросла примерно на $\Delta\text{CCT} \approx 60 \text{ K}$ (см. рисунок 4). Это объясняется тем, что при повышении температуры происходит деградация люминофора, что приводит к спаду эффективности преобразования излучения чипа в видимое, то есть проходит больше синего цвета [3].

Список литературы

1. **Горюнов Н.Н.** Конструкции корпусов и тепловые свойства полупроводниковых приборов / Н.Н. Горюнов. – М.: Энергия, 1972. – 155 с.
2. **Гончарова Ю.С.** Спектральный метод бесконтактного измерения температуры кристаллов полупроводниковых источников света / Ю. С. Гончарова, М. А. Романова, С. В. Смирнов // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 2(36). – С. 38–40.
3. **Сулейманов С.Р.** Нагревание люминофора в светодиоде / С.Р. Сулейманов // Высокие технологии в современной науке и технике. – 2016. – С. 243 – 244.

Секция 3
МЕТРОЛОГИЯ, ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ,
УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ, ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ
ТЕПЛОФИЗИКИ

УДК 006.072

Шабанов Д.Ю., Мирошников А.И.
Shabanov D.Y., Miroshnikov A.I.

ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»,
г. Липецк
Lipetsk State Technical University, Lipetsk

Шабанов Дмитрий Юрьевич – студент кафедры «Прикладная математика»; **Мирошников Артем Игоревич** – к.т.н., доцент кафедры «Прикладная математика».

Shabanov Dmitry Yuryevich – student of the «Applied Mathematics» Department; **Miroshnikov Artem Igorevich** – Ph.D., associate professor of the «Applied Mathematics» Department.

**Управление качеством поставщиков на заводе-производителе
тянутой металлической проволоки**

Supplier quality management in drawn metal wire manufacturing plant

Ключевые слова: спецификация; процесс утверждения; входной контроль; обработка жалоб поставщикам; аудит поставщиков; оценка поставщиков; внешние партнерские отношения.

Аннотация: Рассмотрено управление качеством поставщиков на заводе-производителе тянутой металлической проволоки.

Key words: specification; approval process; incoming control; handling complaints to suppliers; supplier audit; evaluation of suppliers; external partnerships.

Abstract: Supplier quality management at a drawn metal wire manufacturing plant is considered.

Заводы-производители, в том числе тянутой металлической проволоки, составляют подробное руководство по требованиям к поставщикам, в котором изложены общие условия и требования. Эти положения являются

частью коммерческого соглашения между заводом и поставщиком. Требования к поставщикам базируются на требованиях международного стандарта ISO 9001:2015 [1], типового договора поставки завода-производителя и направлены на достижение целей завода-производителя тянутой металлической проволоки по повышению качества и эксплуатационных характеристик выпускаемой продукции, соответствующих требованиям и ожиданиям потребителя.

Меры контроля, применяемые к внешнему поставщику, зависят от потенциального влияния процессов, продуктов и услуг, предоставляемых извне, на способность завода-производителя последовательно удовлетворять требованиям клиентов и применимым законодательным и нормативным требованиям.

В процессе управления качеством поставщиков определяются семь подпроцессов:

- обработка спецификации;
- процесс утверждения;
- входной контроль;
- обработка жалоб поставщикам;
- аудит поставщиков;
- оценка поставщиков;
- внешние партнерские отношения: процесс, непосредственно

связанный с технологическими мероприятиями [2].

Чтобы обеспечить правильную доставку от поставщиков, обязательным требованием является составление спецификации, содержащей все важные критерии и аспекты. Эти критерии описывают продукт, упаковку и/или услугу. Эти подписанные спецификации можно рассматривать как "контракт" между заводом-производителем и его поставщиком. Помимо спецификаций, все ответственные поставщики подписывают руководство по требованиям к поставщикам завода-производителя тянутой металлической проволоки.

Аудит поставщика проводится с целью получения уверенности в том, что продукция, выпускаемая предприятием-поставщиком, соответствует установленным требованиям, качество является стабильным и СМК, действующая на предприятии, способствует постоянному улучшению качества продукции.

Результаты аудита предоставляются поставщику в форме отчета аудита. Поставщик обязан в запрашиваемые сроки разработать план корректирующих мероприятий для устранения замечаний и после согласования с заводом-производителем осуществить их выполнение и предоставить подтверждение их выполнения в согласованные сроки.

Для оценки способности потенциальных поставщиков удовлетворять требованиям приобретенного продукта до начала регулярных поставок запускается процесс утверждения. Рекомендация запуска данного подтверждения для определенного продукта/поставщика может быть сделана по коммерческим/качественным/техническим причинам.

Все приобретенные продукты, влияющие на качество выполняемых работ и конечного продукта, проверяются и тестируются на заводах в процессе входного контроля. Качество поступающих материалов обеспечивается программой качества закупок, которая координируется сертифицированным аудитором по качеству и центральной группой закупок.

С помощью процедуры обработки жалоб поставщиков завод-производитель хочет эффективно и оперативно принимать советующие меры, и взаимодействовать с поставщиками с целью устранения несоответствий (качество, доставка, логистика, дизайн, оформление документов и так далее), чтобы предотвратить повторение подобных ситуаций в дальнейшем.

Завод-производитель может принять решение о подаче жалобы на основании причин, связанных с качеством (отчет об испытаниях не соответствует спецификации, повреждения или дефекты, технологические

возможности и так далее), чтобы гарантировать, что в закупках отсутствует продукт, который не соответствует указанным требованиям.

Поставщики оцениваются заводом с определенной периодичностью (минимум 1 раз в год) на основе операционных и стратегических параметров [3].

В результате оценки и опыта работы с поставщиками могут быть приняты меры для улучшения работы поставщиков, например, аудит поставщиков, технические совещания, совещания, связанные с коммерческими аспектами и так далее.

На заводе-производителе тянутой металлической проволоки используется стандартная система калькуляции затрат для управления и предоставления актуальной, точной и своевременной финансовой информации и анализа с целью предоставления руководству данных и поддержки в процессе принятия решений.

Эта стандартная система калькуляции затрат представляет собой единую систему финансового учета, отчетности и консолидации, применяемую во всей группе завода-производителя тянутой металлической проволоки, которая выполняет:

- консолидированный учет;
- проверку точности стандартов;
- финансовый анализ для оценки фактической деятельности группы и ее различных компонентов путем сравнения со стандартами;
- анализ финансовой исторической информации.

Эта система соответствует всем применимым правовым и законодательным требованиям, а также соответствует системе управления завода-производителя тянутой металлической проволоки.

Список литературы

1. **Борисова Т.А.** Системы менеджмента качества: учебное пособие / Т.А. Борисова, В.Я. Дмитриев. – СПб.: Издательство Санкт-Петербургского университета технологий управления и экономики, 2017. – 168 с.

2. **Куц С.П.** Маркетинг взаимоотношений на промышленных рынках / С.П. Куц. – Санкт-Петербург: Издательство Санкт-Петербургского университета, 2016. – 272 с.

3. **Крылатков П.П., Прилуцкая М.А.** Управление цепью поставок (SCM): учебное пособие / П. П. Крылатков, М.А. Прилуцкая. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 140 с.

Блюмин С.Л., Плотников А.В., Григорьев А.С.
Blyumin S.L., Plotnikov A.V., Grigoriev A.S.

ФГБОУ ВО "Липецкий государственный технический университет", г.
Липецк

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

Блюмин Семён Львович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры "Прикладной математики" Липецкого государственного технического университета. **Плотников Александр Васильевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры "Прикладной математики" Липецкого государственного технического университета. **Григорьев Андрей Сергеевич** – аспирант кафедры "Прикладной математики" Липецкого государственного технического университета.

Blyumin Semen Lvovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department "Applied Mathematics"; **Plotnikov Aleksandr Vasilevich** – candidate of technical Sciences, docent of the Department "Applied Mathematics". **Grigoriev Andrey Sergeevich** – postgraduate of the Department "Applied Mathematics".

**Моделирование эллиптической области неопределенности
измерения комплексной величины**

Modeling an elliptical uncertainty region for a complex quantity

Ключевые слова: неопределенность измерений, измерительные системы, эллипс неопределенности, двумерное нормальное распределение, математическое моделирование.

Аннотация: Применены методы метрологического обеспечения, устанавливающие уровень достоверности измерений электрической энергии, потребляемой мехатронной системой. Приведен пример генерации выборки комплексной величины полной мощности на основе двумерного нормального распределения. Осуществлено моделирование эллиптической области неопределенности измерения в программной среде MATLAB.

Key words: measurement uncertainty, measurement systems, elliptical uncertainty region, multivariate normal distribution, mathematical modelling.

Abstract: This paper deals methods of metrological support, which define the level of reliability of measurements of electrical energy consumed by the mechatronic system. An example of modeling a sample of a complex value power based on a two-dimensional normal distribution is given. The modeling of the elliptical uncertainty region in the MATLAB software environment has been carried out.

Введение.

Исследование нормативного соответствия метрологического оборудования требованиям потребителей, посредством определения критериев качества, является актуальным вопросом автоматизации производства. Многие современные аспекты управления качеством и метрологического надзора опираются на суммарную неопределенность измерения и знания статистического распределения измеряемой величины.

Автоматизированная информационно-измерительная система (АИИС) «Электроучет» направлена на оперативный учет потребления электроэнергии в ходе ведения технологических режимов металлургической компании ПАО «НЛМК». Для установления метрологических характеристик её измерительного оборудования требуется оценить неопределенность косвенного измерения физической величины полной мощности S , ВА [1].

Полная мощность не может напрямую измеряться системой, поскольку является комплексной величиной и определяется соотношением (1)

$$S = P + jQ, \quad (1)$$

где P , Вт – активная мощность; Q , Вар – реактивная мощность, j – мнимая единица.

Цель данной работы – провести моделирование измерений полной мощности S , а также построить эллиптическую область неопределенности.

Двумерное нормальное распределение

Значение P и Q получены во время эксперимента поверки реестровых приборов учета электрической энергии типа «СЭТ-4ТМ.02М», подчиняются нормальному закону распределения. Они составляют $\bar{P} = 519,89$, $\bar{Q} = 555,92$ со стандартными неопределенностями $u(P) = 0,1471$, $u(Q) = 0,3517$, и $r = 0$ соответственно.

Каждая из случайных величин, входящих в модель измерения полной мощности S , подчиняется нормальному закону распределения. Также допускается их независимость. В связи с этим можно считать, что S

подчиняется двумерному нормальному распределению. Таким образом, для моделирования результатов измерения полной мощности $S = f(P, Q)$ применяется двумерное нормальное распределение.

Нормальный закон распределения многомерного вектора в общем виде представляется в виде:

$$f(\bar{x}) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^n \det V}} e^{-\frac{1}{2}(\bar{x}-\bar{m})^T V^{-1}(\bar{x}-\bar{m})} \quad (2)$$

Нормальное распределение системы $f(P, Q)$ задается СКО $u(P)$, $u(Q)$ и коэффициентом корреляции r , определяющими корреляционную матрицу [2]:

$$V(S) = \begin{pmatrix} u^2(P) & ru(P)u(Q) \\ ru(P)u(P) & u^2(Q) \end{pmatrix} \quad (3)$$

Выражая определитель и обратную ковариационную матрицу через параметры рассеивания и подставив их в (2) при $n = 2$, получим плотность двумерного нормального распределения, заданного $\bar{P}, \bar{Q}, u(P), u(Q), r$:

$$f(P, Q) = \frac{1}{2\pi u(P)u(Q)\sqrt{1-r^2}} e^{-\frac{1}{2(1-r^2)} \left[\frac{(P-\bar{P})^2}{u^2(P)} - 2r \frac{(P-\bar{P})(Q-\bar{Q})}{u(P)u(Q)} + \frac{(Q-\bar{Q})^2}{u^2(Q)} \right]} \quad (4)$$

Модель рассеивания для случайной величины полной мощностигенерирована в программном пакете MATLAB при помощи функции "mvnrnd" согласно (4). Смоделированная выборка из 1000 измерений представлена на рис. 3 в виде пустых точек. Фрагмент кода, генерирующий это распределение представлен на рис.1.

```

1 function [z] = Gaussian2(mu, sigma, amount)
2 -     z = mvnrnd(mu, sigma, amount);
3 - end

```

Рис. 1. Генерации результатов измерения.

Функция “mvnrnd” получает на вход вектор мат. ожиданий (mu) (5)

$$M(P, Q) = [519.89 \quad 555.92] \quad (5)$$

и ковариационную матрицу (σ) (6), выраженную по(3)

$$V(S) = \begin{bmatrix} 0,0216 & 0 \\ 0 & 0,1237 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Эллиптическая область неопределенности

Графическим представлением области неопределенности является эллипс рассеивания с доверительным уровнем 95 %. Эллипс центрируется вокруг вектора средних взвешенных оценок (5) и повернут относительно большей полуоси на угол α . Каноническое уравнение выглядит следующим образом:

$$\frac{(x - \bar{P})^2}{a^2} + \frac{(y - \bar{Q})^2}{b^2} = 1, \quad (7)$$

где \bar{P} и \bar{Q} - координаты центра, a и b - полуоси.

Для моделирования в среде MATLAB каноническое уравнение смещенного эллипса (7) выражается в параметрической форме:

$$\begin{aligned} X(t) &= \bar{P} + a \cos t \cos \alpha - b \sin t \sin \alpha \\ Y(t) &= \bar{Q} + a \cos t \sin \alpha + b \sin t \cos \alpha \end{aligned} \quad (8)$$

где параметр t изменяется от 0 до 2π , α - угол между осью x и большей из полуосей эллипса.

Малая и большая полуоси рассчитываются исходя из соотношений $u(P)$, $u(Q)$ и $k_{2,p}$ - двумерного коэффициента покрытия, уравнение (8) соответственно [3,4]:

$$a = U(P) = u(P) \cdot k_{2,p}$$

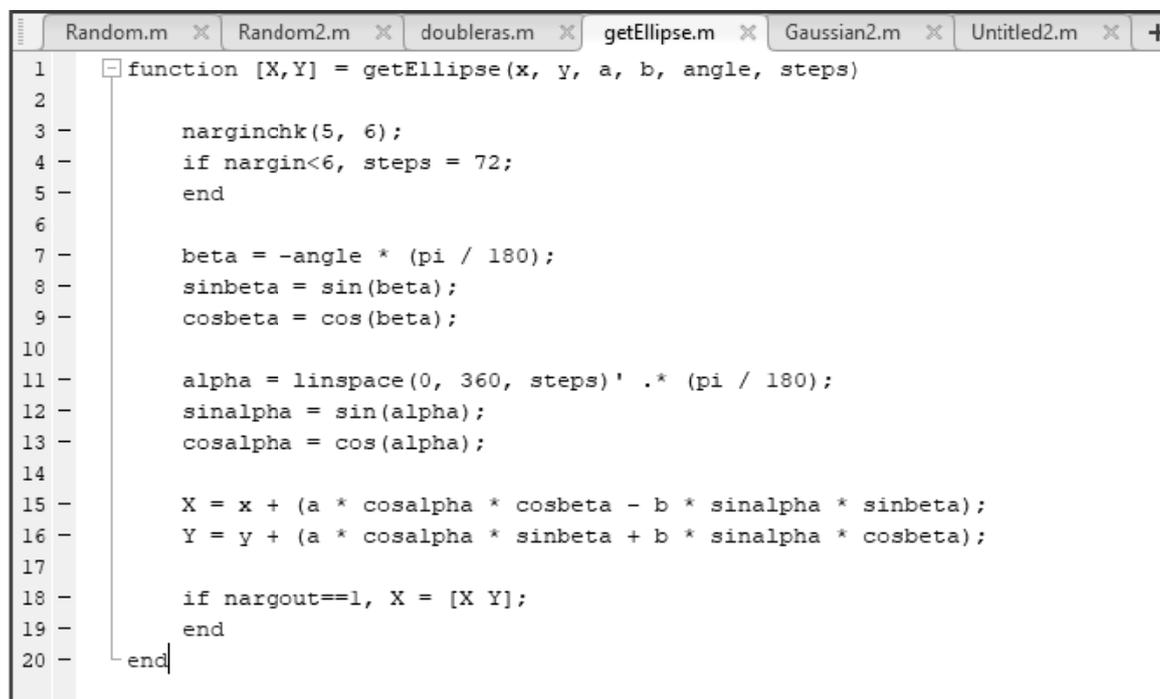
$$b = U(Q) = u(Q) \cdot k_{2,p}$$

Угол поворота α находится из условия обращения в ноль недиагональных элементов матрицы (3) после преобразования

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctg \left(\frac{2ru(P), u(Q)}{u^2(P) - u^2(Q)} \right), \text{ при } u(P) \neq u(Q)$$

Исходя из допущения о некоррелируемых входных величин, угол поворота (angle) $\alpha = 0$.

Построение эллипса в MATLAB осуществляется посредством функции "getEllipse", подставляя в (8) заданные параметры \bar{P} , \bar{Q} , a, b и α . Фрагмент кода представлен на рис. 2.



```
1 function [X,Y] = getEllipse(x, y, a, b, angle, steps)
2
3     narginchk(5, 6);
4     if nargin<6, steps = 72;
5     end
6
7     beta = -angle * (pi / 180);
8     sinbeta = sin(beta);
9     cosbeta = cos(beta);
10
11     alpha = linspace(0, 360, steps)' .* (pi / 180);
12     sinalpha = sin(alpha);
13     cosalpha = cos(alpha);
14
15     X = x + (a * cosalpha * cosbeta - b * sinalpha * sinbeta);
16     Y = y + (a * cosalpha * sinbeta + b * sinalpha * cosbeta);
17
18     if nargin==1, X = [X Y];
19     end
20 end
```

Рис. 2 Эллипса неопределенности измерения S.

Эллипс рассеивания

В результате работы смоделированы измерения полной мощности, неопределенность выражена в виде эллипса рассеивания уровнем достоверности 95% - рис.3.

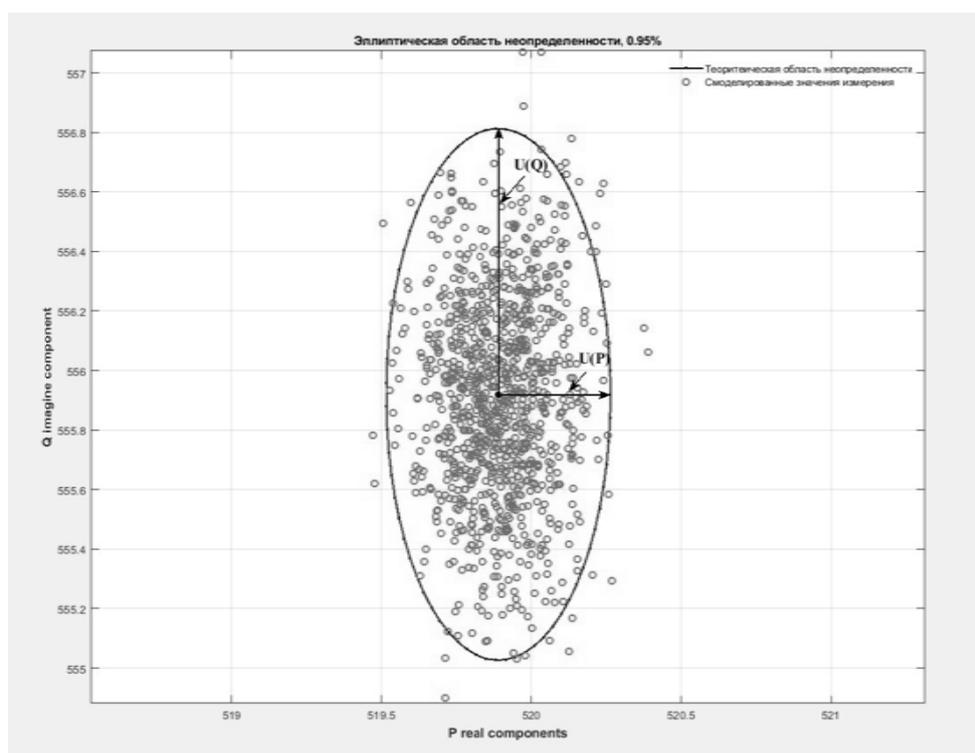


Рис. 3. Результаты моделирования.

Точками отмечены измерения комплексной величины полной мощности, подчиняющиеся двумерному нормальному распределению. Сплошной линией обозначена эллиптическая область неопределенности. Смоделированные измерения укладываются в эллипс неопределенности с вероятностью в 95 %.

По рис. 3. наглядно заметно, что полуось эллипса $U(Q)$ больше полуоси $U(P)$. Это свидетельствует о большем влиянии мнимой части (реактивной мощности) на результаты измерения полной мощности S .

Заключение. Полученные результаты моделирования могут использоваться для установления метрологических характеристик измерительного оборудования и оценки качества измерений, для информационно-измерительной системы «Электроучет». В предположении о корреляции между случайными входными величинами в дальнейших работах будет выполняться моделирование эллиптической области, повернутой на угол α отличный от 0 градусов.

Список литературы

1. **Плотников А.В.** Применение методов метрологического обеспечения к оценке качества результатов учета электрической энергии при функционировании мехатронных систем / Плотников А.В., Григорьев А.С. – 2 научно-практическая международная конференция / Информационные технологии в управлении и моделировании мехатронных систем / Тамбов – 2020.
2. **Hall B.D.** Calculating measurement uncertainty for complex-valued quantities, *Measurement Science and Technology* – Vol. 14, No. 3, 368 - 375, 2003.
3. **Meng Y.S.** Measurement uncertainty of complex-valued microwave quantities, *Progress In Electromagnetics Research*, / Meng, Y. S, Y. Shan - Vol. 136, 421 - 433, 2013.
4. **Hall B.D.** Notes on complex measurement uncertainty – part 2 / B.D Hall – Industrial Research Limited Report 2557. – Lower Hutt, New Zealand. 2012. – 41 p. 7.

Майникова Н.Ф., Рогов И.В., Гришин А.В.
Mainikova N.F., Rogov I.V., Grishin A.V.

ФГБОУ ВО "Тамбовский государственный технический университет",
г. Тамбов

Tambov State Technical University, Tambov

Майникова Нина Филипповна – д.т.н., профессор, профессор кафедры "Энергообеспечение предприятий и теплотехника"; **Рогов Иван Владимирович** – к.т.н., доцент кафедры "Энергообеспечение предприятий и теплотехника"; **Гришин Александр Витальевич** – аспирант кафедры "Энергообеспечение предприятий и теплотехника".

Mainikova Nina Filippovna – doctor of engineering, Professor, Professor of the Department "Power supply and heat engineering"; **Rogov Ivan Vladimirovich** – candidate of technical Sciences, docent of the Department "Power supply and heat engineering"; **Grishin Alexander Vitalievich** – post-graduate student of the Department "Power supply and heat engineering".

Постановка и решение краевой задачи нестационарного теплопереноса применительно к трехслойной системе

Staging and solving a boundary value problem non-stationary heat transfer in relation to the three-layer system

Ключевые слова: неразрушающий тепловой контроль, математическая модель, покрытие, теплопроводность.

Аннотация: Получено решение краевой задачи теплопереноса применительно к трёхслойной системе.

Key words: non-destructive thermal control, mathematical model, coating, thermal conductivity.

Abstract: The solution of the regional heat transfer problem is obtained in relation to the three-layer system.

Рассматривается система, тепловая схема которой представлена на рисунке [1, 2].

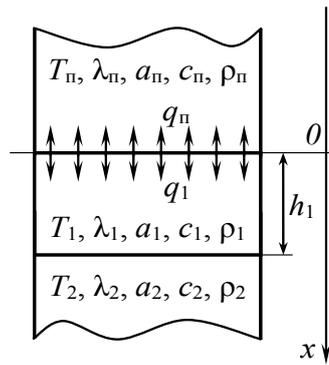


Рис. 1 – Тепловая схема: Н – нагреватель, ТП – термоприемник, ИЗ – измерительный зонд.

Требуется найти распределение температуры по длине стержней в любой момент времени. Источник тепла постоянной мощности q действует на протяжении всего процесса нагрева ($q = q_1 + q_п$).

Краевая задача теплопроводности:

$$\partial T_1(x, \tau) / \partial \tau = a_1 \cdot \left[\partial^2 T_1(x, \tau) / \partial x^2 \right], \quad \tau > 0, \quad 0 < x < h_1; \quad (1)$$

$$\partial T_2(x, \tau) / \partial \tau = a_2 \cdot \left[\partial^2 T_2(x, \tau) / \partial x^2 \right], \quad \tau > 0, \quad h_1 < x < \infty; \quad (2)$$

$$\partial T_п(x, \tau) / \partial \tau = a_п \cdot \left[\partial^2 T_п(x, \tau) / \partial x^2 \right], \quad \tau > 0, \quad -\infty < x < 0; \quad (3)$$

$$T_1(x, 0) = T_2(x, 0) = T_п(x, 0) = 0; \quad (4)$$

$$T_1(0, \tau) = T_п(0, \tau); \quad T_1(h_1, \tau) = T_2(h_1, \tau); \quad (5,6)$$

$$-\lambda_1 \cdot \left[\partial T_1(h_1, \tau) / \partial x \right] = -\lambda_2 \cdot \left[\partial T_2(h_1, \tau) / \partial x \right]; \quad (7)$$

$$q = -\lambda_1 \cdot \left[\partial T_1(0, \tau) / \partial x \right] + \lambda_п \cdot \left[\partial T_п(0, \tau) / \partial x \right] + C_н \cdot \left[\partial T_1(0, \tau) / \partial \tau \right]; \quad (8)$$

$$T_2(+\infty, \tau) = T_п(-\infty, \tau) = 0, \quad (9)$$

где T_i – избыточная температура; x – координата; τ – время; q – плотность теплового потока; $a_i, c_i, \lambda_{i,i}$ – соответственно температуропроводность, удельная теплоемкость, теплопроводность i -ого тела; h_1 – толщина тела 1; $C_н$ – теплоемкость единицы площади нагревателя; ρ – плотность. Индексы: 1, 2 – материалы первого и второго тел; п – материал подложки зонда [3].

Применено интегральное преобразование Лапласа. Решения в области изображений (10) – (12):

$$T_{1L}(x, p) = \left[q \cdot \left(h^* \cdot \exp\left((x - 2h_1) \sqrt{p/a_1} \right) + \exp\left(-x \sqrt{p/a_1} \right) \right) \right].$$

$$\cdot \left[p\sqrt{p} \cdot \left(h^* (\varepsilon_n - \varepsilon_1 + C_H \sqrt{p}) \cdot \exp(-2h_1 \sqrt{p/a_1}) + \varepsilon_n + \varepsilon_1 + C_H \sqrt{p} \right) \right]^{-1} \quad (10)$$

$$T_{2L}(x,p) = \left[q \cdot \exp\left(\left(h_1 \sqrt{p} \cdot (\sqrt{a_2} - \sqrt{a_1}) \right) / \sqrt{a_1 \cdot a_2} \right) \cdot \exp(-x \sqrt{p/a_2}) \cdot (h^* + 1) \right] \cdot$$

$$\cdot \left[p\sqrt{p} \cdot \left(h^* (\varepsilon_n - \varepsilon_1 + C_H \sqrt{p}) \cdot \exp(-2h_1 \sqrt{p/a_1}) + \varepsilon_n + \varepsilon_1 + C_H \sqrt{p} \right) \right]^{-1} \quad (11)$$

$$T_{nL}(x,p) = \left[q \cdot \left(h^* \cdot \exp(-2h_1 \sqrt{p/a_1}) + 1 \right) \cdot \exp(x \sqrt{p/a_n}) \right] \cdot$$

$$\cdot \left[p\sqrt{p} \cdot \left(h^* (\varepsilon_n - \varepsilon_1 + C_H \sqrt{p}) \cdot \exp(-2h_1 \sqrt{p/a_1}) + \varepsilon_n + \varepsilon_1 + C_H \sqrt{p} \right) \right]^{-1} \quad (12)$$

Выполнить обратное преобразование для выражений (10) – (12) затруднительно. Далее рассматривается упрощённый вариант – задача относительно плотности теплового потока q для двухслойной системы [2]:

$$\frac{\partial T_1(x,\tau)}{\partial \tau} = a_1 \cdot \frac{\partial^2 T_1(x,\tau)}{\partial x^2}, \quad \tau > 0, \quad 0 < x < h_1; \quad (13)$$

$$\frac{\partial T_2(x,\tau)}{\partial \tau} = a_2 \cdot \frac{\partial^2 T_2(x,\tau)}{\partial x^2}, \quad \tau > 0, \quad h_1 < x < \infty; \quad (14)$$

$$T_1(x,0) = T_2(x,0) = 0; \quad T_1(h_1, \tau) = T_2(h_1, \tau); \quad (15,16)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(h_1, \tau)}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2(h_1, \tau)}{\partial x}; \quad (17)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1(0, \tau)}{\partial x} = q; \quad (18)$$

$$T_2(\infty, \tau) = 0. \quad (19)$$

Введены обозначения: $Fo = \frac{a_1 \tau}{(h_1)^2}$, $\tilde{x} = \frac{x}{h_1}$, $K_\lambda = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$, $K_a = \frac{a_1}{a_2}$, $\Theta_1 = \frac{T_1 \lambda_1}{q h_1}$,

$$\Theta_2 = \frac{T_2 \lambda_1}{q h_1},$$

где Fo , \tilde{x} – безразмерные время (число Фурье) и координата; K_λ , K_a – относительные теплопроводность и температуропроводность тел; Θ_1 и Θ_2 –

температура в безразмерном представлении для тел 1 и 2. Задача (13) – (19) принимает следующий вид:

$$\frac{\partial \Theta_1(\tilde{x}, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 \Theta_1(\tilde{x}, Fo)}{\partial \tilde{x}^2}, \quad Fo > 0, \quad 0 < \tilde{x} < 1; \quad (20)$$

$$\frac{\partial \Theta_2(\tilde{x}, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 \Theta_2(\tilde{x}, Fo)}{\partial \tilde{x}^2} \frac{1}{K_a}, \quad Fo > 0, \quad 1 < \tilde{x} < \infty; \quad (21)$$

$$\Theta_1(\tilde{x}, 0) = \Theta_2(\tilde{x}, 0) = 0; \quad (22)$$

$$\Theta_1(1, Fo) = \Theta_2(1, Fo); \quad (23)$$

$$K_\lambda \frac{\partial \Theta_1(1, Fo)}{\partial \tilde{x}} = \frac{\partial \Theta_2(1, Fo)}{\partial \tilde{x}}; \quad (24)$$

$$-\frac{\partial \Theta_1(0, Fo)}{\partial \tilde{x}} = 1; \quad (25)$$

$$\Theta_2(\infty, Fo) = 0. \quad (26)$$

Решение:

$$\Theta_1(\tilde{x}, Fo) = 2\sqrt{Fo} \operatorname{ierfc}\left(\frac{\tilde{x}}{2\sqrt{Fo}}\right) + 2\sqrt{Fo} \sum_{n=1}^{\infty} (h^*)^n \left(\operatorname{ierfc}\left(\frac{(2n - \tilde{x})}{2\sqrt{Fo}}\right) + \operatorname{ierfc}\left(\frac{(2n + \tilde{x})}{2\sqrt{Fo}}\right) \right), \quad (27)$$

$$\Theta_2(\tilde{x}, Fo) = \frac{4\sqrt{Fo}K_\varepsilon}{(1 + K_\varepsilon)} \sum_{n=1}^{\infty} (h^*)^{n-1} \operatorname{ierfc}\left(\frac{(\tilde{x} - 1)\sqrt{K_a} + (2n - 1)}{2\sqrt{Fo}}\right). \quad (28)$$

Введены обозначения: $K_\varepsilon = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$; $h^* = \frac{1 - K_\varepsilon}{1 + K_\varepsilon} = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}$.

Ряды в решениях (27) – (28) хорошо сходятся при малых значениях времени (Фурье). Справедливо равенство:

$$q_{1L}(x, p) = -\lambda_1 \cdot [dT_{1L}(x, p)/dx], \quad 0 < x < h_1$$

Из выражения (10) найдены $q_{1L}(x, p)$. Определено изображение плотности теплового потока для $x = 0$. Получено решение задачи относительно q при больших значениях времени.

Тогда: $q_1(0, +\infty) = (q \cdot \varepsilon_2) / (\varepsilon_n + \varepsilon_2)$. $q_n(0, +\infty) = (q \cdot \varepsilon_n) / (\varepsilon_n + \varepsilon_2)$.

Если на тепловой схеме трехслойной системы не рассматривать подложку, учесть потери тепловой энергии в нагревателе, то, при разделении общего теплового потока на два, упрощается краевая задача (1) – (9).

$$\text{Решение } T_1'(0, \tau) = (2q_1 \sqrt{\tau}) / (\varepsilon_2 \cdot \sqrt{\pi}) + (q_1 \cdot h_1 \cdot (\varepsilon_2^2 - \varepsilon_1^2)) / (\varepsilon_2^2 \cdot \lambda_1).$$

С учётом частного решения: $T_1(0, \tau) = (2q\sqrt{\tau}) / ((\varepsilon_2 + \varepsilon_n)\sqrt{\pi})$. Получено:

$$T_1(0, \tau) = (2q\sqrt{\tau}) / ((\varepsilon_2 + \varepsilon_n)\sqrt{\pi}) + \left[(q \cdot h_1 \cdot (\varepsilon_2^2 - \varepsilon_1^2)) / \lambda_1 - q \cdot C_n \right] \cdot (\varepsilon_2 + \varepsilon_n)^{-2}.$$

В линейном виде: $T_1(0, \tau) = b_1 \sqrt{\tau} + b_0$.

$$\text{Здесь: } b_1 = \frac{2q}{(\varepsilon_2 + \varepsilon_n)\sqrt{\pi}}, \quad b_0 = \frac{(q \cdot h_1 \cdot (\varepsilon_2^2 - \varepsilon_1^2)) / \lambda_1 - q \cdot C_n}{(\varepsilon_2 + \varepsilon_n)^2}$$

Из последнего выражения можно определить теплопроводность материала покрытия (первого тела) [3].

Список литературы

1. **Лыков А.В.** Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967– 559 с.
2. **Моделирование** теплопереноса в методе неразрушающего контроля двухслойных материалов / Жуков Н.П., Майникова Н.Ф., И.В. Рогов И.В., Антонов А.О. // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2013.– Т. 19, № 3. – С. 506 – 511.
3. **Применение** неразрушающего теплового контроля при исследовании полимерно-металлических изделий / Майникова Н.Ф., Горбунова А.Ю., Калинина Н.К., Яковлева К.А. // Пластические массы. 2020. – № 9 – 10. – С. 59 – 61.

Аль-Бусаиди С.С.С., Пономарев С.В.
Al-Busaidi S.S.S., Ponomarev S.V.

ФГБОУ ВО "Тамбовский государственный технический университет",
г. Тамбов

Tambov State Technical University, Tambov

Аль-Бусаиди Саид Султан Саид – соискатель кафедры "Мехатроника и технологические измерения"; **Пonomarev Сергей Васильевич** – д.т.н., профессор, профессор кафедры "Мехатроника и технологические измерения".

Al-Busaidi Said Sultan Said – Degree seeker of the Department "Mechatronics and technological measurements"; **Ponomarev Sergei Vasilievich** – doctor of engineering, Professor, Professor of the Department "Mechatronics and technological measurements".

Процедурная модель осуществления процесса «8.9 Анализ со стороны руководства» в испытательной лаборатории

Procedural model for implementation of the process "8.9 management review" in the test laboratory

Ключевые слова: Анализ со стороны руководства, риски, возможности, выявление, оценка результатов, улучшение работы.

Аннотация: Процедурная модель процесса «8.9 Анализ со стороны руководства» предусматривает: 1) выявление имеющихся рисков и/или возможностей улучшения анализируемого процесса испытательной лаборатории (ИЛ); 2) подготовку принятия управленческих решений, а затем планирование выполнения деятельности в ИЛ в очередном году.

Key words: Analysis by management, risks, opportunities, identification, evaluation of results, improvement of work.

Abstract: The procedural model of the process "8.9 Management review" provides: 1) identification of existing risks and/or opportunities for improvement of the analyzed process of the testing laboratory (TL); 2) preparation of managerial decision-making, and then planning the implementation of actions for the next year.

Процедурная модель осуществления процесса «8.9 Анализ со стороны руководства», в своей взаимосвязи с другими процессами системы менеджмента (СМ) испытательной лаборатории (ИЛ), проиллюстрирована в виде блок-схемы, приведённой на рис. 1.

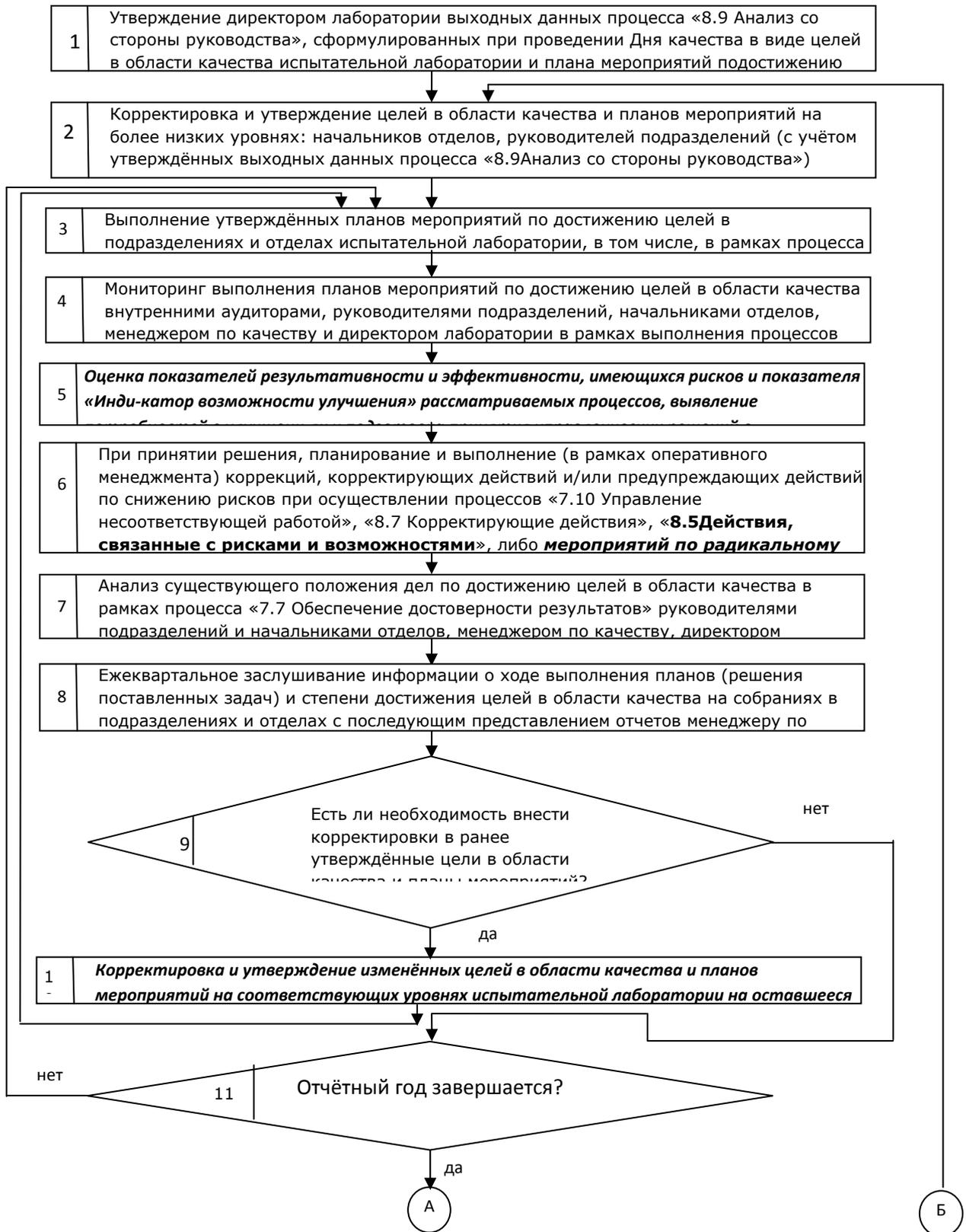


Рис. 1. Процедурная модель осуществления процесса «8.9 Анализ со стороны руководства» в СМ ИЛ (начало); элементы новизны выделены полужирным курсивом

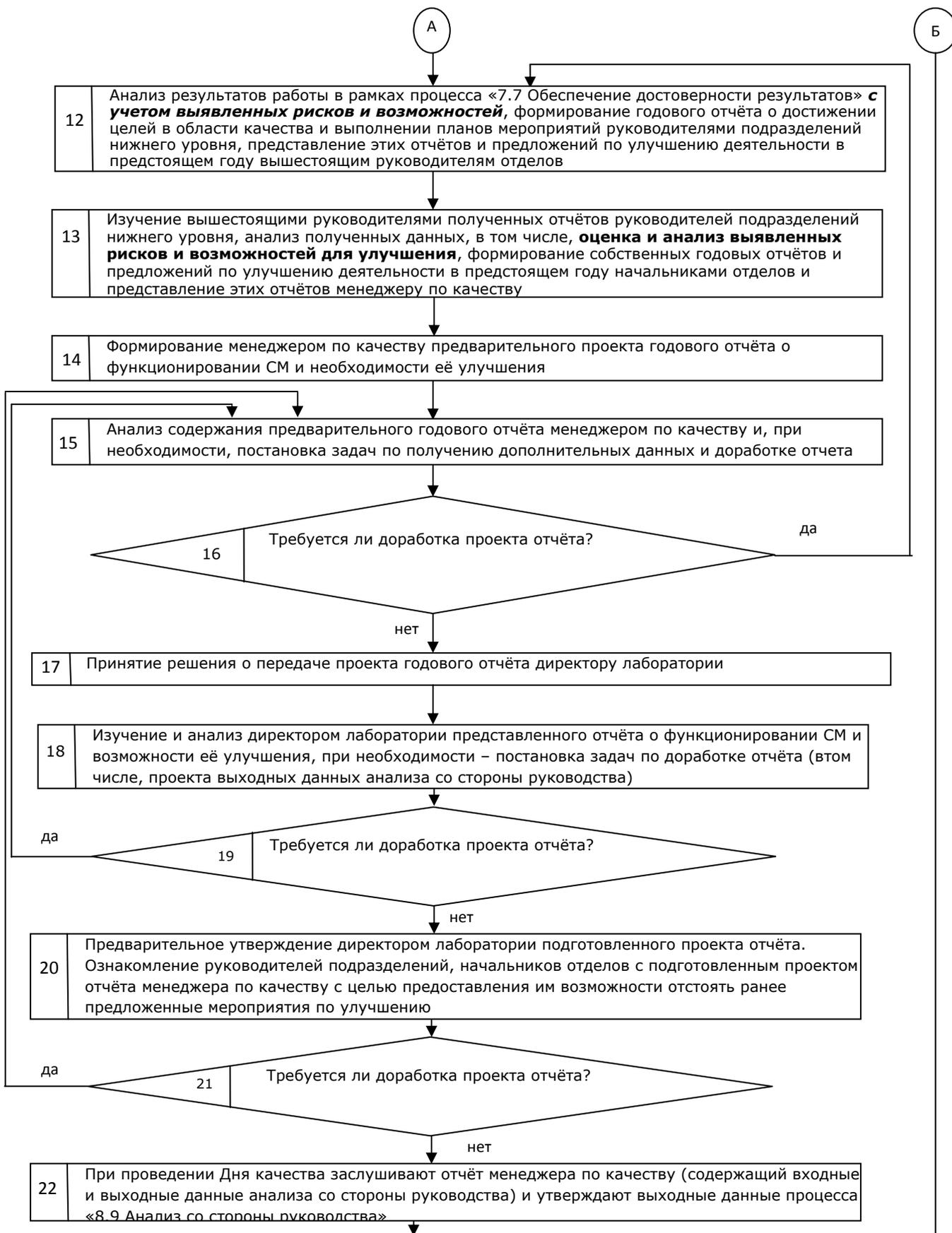


Рис. 1. (окончание).

Осуществление процесса «8.9 Анализ со стороны руководства» в СМ ИЛ достаточно понятно проиллюстрировано блок-схемой, представленной на рис. 1. Рассмотрим подробнее деятельность в ИЛ, предусмотренную блоками 5, 6, 10, 12 и 13, которые содержат элементы научной новизны.

Пятый блок на рис. 1 предполагает проведение анализа показателей результативности и эффективности каждого процесса СМ ИЛ, существующих рисков и потенциальных возможностей, выявление способов улучшений, подготовку принятия и разработку проектов решений в случае, если есть необходимость вмешаться в ход процессов СМ ИЛ.

Шестой блок предполагает (после принятия решения) планирование и выполнение (в рамках оперативного менеджмента) корректирующих и предупреждающих действий (по предотвращению последствий выявленных рисков), либо мероприятий по радикальному улучшению рассматриваемого процесса СМ ИЛ в рамках осуществления процессов:

«7.10 Управление несоответствующей работой»;

«8.5 Действия, связанные с рисками и возможностями»;

«8.6 Улучшение» (с учётом выявленных возможностей);

«8.7 Корректирующие действия».

Если при проверке условия, представленного в блоке 9 на рис. 1, выявляется необходимость корректировки (правки) ранее утверждённых целей в области качества (ЦвОК) и планов мероприятий, то, согласно 10 блоку, осуществляется изменение и утверждение скорректированных ЦвОК и планов мероприятий на тех уровнях ИЛ, где это необходимо, на оставшийся промежуток времени.

В четвёртом квартале начинают работу, предусмотренную блоком 12, которая предполагает анализ итогов работы в области процесса «7.7 Обеспечение достоверности результатов» (опираясь на выявленные недочёты (несоответствия), риски и потенциальные возможности, формирование годовых отчётов о функционировании системы менеджмента и

целесообразности ее улучшения (п. 5.6 d ГОСТ ISO/IEC17025-2019) руководителями подразделений нижнего уровня. После данные сведения (отчёты) направляются вышестоящим руководителям.

Блок 13 подразумевает анализ вышестоящим руководством отделов отчётов, полученных от руководителей подразделений нижнего уровня, оценку этих данных, а именно, оценку и анализ найденных рисков и возможностей для улучшения, и формирование собственных годовых отчётов начальниками отделов и представление данных сведений менеджеру по качеству.

УДК 53.088

Гришин А.В., Горбунова А.Ю., Овсянникова В.А., Овсянников О.А.
Grishin A.V., Gorbunova A.Yu., Ovsyannikova V.A. Ovsiannikov O. A.

ФГБОУ ВО "Тамбовский государственный технический университет",
г. Тамбов

Tambov State Technical University, Tambov

Гришин Александр Витальевич, Горбунова Анастасия Юрьевна – аспиранты кафедры "Энергообеспечение предприятий и теплотехника";
Овсянникова Валерия Алексеевна, Овсянников Олег Алексеевич – студенты.

Grishin Alexander Vitalievich, Gorbunova Anastasia Yuryevna – post-graduate student of the Department " Power supply and heat engineering";
Ovsyannikova Valery Alekseevna, Ovsiannikov Oleg Alekseevich – Student.

Метрологическая оценка погрешностей метода определения толщины покрытия на металлическом изделии

Metrological assessment of method errors Definitions of the thickness of the coating on the metal product

Ключевые слова: Изделие, контроль, погрешность, покрытие, полимер, толщина.

Аннотация: Представлен результат метрологического эксперимента, позволяющий сделать оценку погрешностей и их характеристик при определении неразрушающим способом толщины покрытий на металле.

Key words: Product, control, error, coating, polymer, thickness.

Abstract: The result of a metrological experiment is presented, which makes it possible to estimate the errors and their characteristics when determining the non-destructive method of coating thickness on the metal.

Разработка и исследование методов и средств, предназначенных для неразрушающего определения толщины покрытий, актуальны, т.к. толщина слоя покрытия и равномерность его распределения на металлических изделиях являются решающими факторами, влияющими на свойства изделия. Разработана измерительная система, реализующая метод неразрушающего определения толщины тонкослойных покрытий на металлах с повышенной точностью за счет использования режима регуляризации тепловых потоков в

локальном объеме исследуемого объекта на модели одномерного распространения тепла в плоском полупространстве [1, 2].

Реализация метрологического эксперимента осуществлялась на двухслойных образцах из стали Ст3 с акриловым покрытием. Определены погрешности конкретных опытов определения толщины покрытия h (табл. 1).

Измерения проведены при следующих условиях: радиус нагревателя $R_{пл} = 4 \cdot 10^{-3}$ м; мощность на нагревателе $W = 1$ Вт; временной шаг измерения температуры $\Delta\tau = 0,25$ с; материал подложки зонда – рипор; толщина подложки – 20-мм; толщина исследуемого покрытия из акриловой эмали – 0,15мм. Начальная температура опыта $T_n = 20$ °С.

Таблица 1 – Результаты эксперимента на двухслойном изделии из стали с акриловым покрытием.

№	h , мм	№	h , мм	№	h , мм
1	0,149	11	0,148	21	0,152
2	0,147	12	0,152	22	0,154
3	0,151	13	0,155	23	0,146
4	0,154	14	0,154	24	0,148
5	0,144	15	0,147	25	0,154
6	0,147	16	0,146	26	0,152
7	0,145	17	0,148	27	0,149
8	0,152	18	0,149	28	0,147
9	0,154	19	0,151	29	0,152
10	0,149	20	0,147	30	0,151

Часто используемыми характеристиками погрешности являются: математическое ожидание абсолютной погрешности, корень квадратный из дисперсии, доверительный интервал и доверительная вероятность. При помощи такой характеристики как математическое ожидание возможно получить информацию о постоянной составляющей погрешности, а также сформировать предпосылки для ее исправления (табл. 2).

Математическое ожидание и среднюю квадратическую погрешность абсолютной погрешности определения толщины покрытия определяют по зависимостям:

$$M[\Delta h_j] = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \Delta h_j \quad \text{и} \quad \sigma[\Delta h_j] = \left[\lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (\Delta h_j - M[\Delta h_j])^2 \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Здесь m – число экспериментов.

Определяя показания математического ожидания, как характеристики случайной погрешности, можно получить представление об интенсивности случайной погрешности и соотнести полученную информацию с предъявляемыми требованиями. Установив связь средней квадратической погрешности с параметрами блоков измерительной цепи измерительной системы, определяются необходимые значения этих параметров, которые удовлетворяют соответствующим предъявляемым требованиям.

Таблица 2 – Результаты метрологической обработки эксперимента при определении значений толщин покрытий.

Наименования погрешностей и их характеристик при определении значений толщин покрытий	Значения погрешностей и их характеристик
$M[\Delta h_j]$, мм	0,0027
$\sigma[\Delta h_j]$, мм	0,0014
$M^*[\delta h_j]$, мм	0,0182
$\sigma^*[\delta h_j]$, мм	0,0094
$\Delta_{\text{пред}} h_j$, мм	0,0187
$\delta_{\text{пред}} h_j$	0,1249

Характеристики относительной погрешности определения толщины покрытия рассчитаны по следующим формулам:

$$M^*[\delta h_j] = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \delta h_j ; \quad \sigma^*[\delta h_j] = \left[\frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (\delta h_j - M^*[\delta h_j])^2 \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Предельные абсолютные и относительные погрешности определения толщины покрытия рассчитаны следующим образом:

$$\Delta_{\text{пред}} h_j = M[\Delta h_j] + t_{\alpha, m-1} \sigma[\Delta h_j]; \quad \delta_{\text{пред}} h_j = \frac{\Delta_{\text{пред}} h_j}{h_{\text{п}}}$$

Здесь: $t_{\alpha, m-1}$ – коэффициент Стьюдента при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ и количестве измерений $m - 1$.

Экспериментальная проверка работоспособности измерительной системы при термическом анализе двухслойных объектов, основания которых изготовлены из сталей марок Ст20, Ст3, Ст08кп; сплавов алюминия Д16, А5Н, АМГ, а в качестве покрытий использованы эпоксидная эмаль ВДЭП Р-270 «ЕРОХ», полиуретановая эмаль торговой марки «Симфония Винер» и акриловая термостойкая эмаль фирмы «Престиж», показала, что погрешность определения толщины покрытия на металлическом основании – до 7% [3, 4].

Список литературы

1. **Жуков Н.П.** Метод неразрушающего определения толщины защитных покрытий / Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова, И.В. Рогов // Вестник Тамбовского государственного технического университета, – 2017, Т. 23. № 1, – С. 6 – 11.
2. **Жуков Н.П.** Измерительно-вычислительная система неразрушающего теплофизического контроля / Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2005, № 2. – С. 153.
3. **Экспериментальное** определение теплопроводности покрытий металлических изделий / Н.Ф. Майникова, А.А. Желтов, В.А. Овсянникова, О.А. Овсянников. // Материалы 6-й международной научно-практической конференции Института архитектуры, строительства и транспорта. Тамбов, – Тамбов, Изд-во Першина Р.В., –2019. – С. 274 – 277.
4. **Применение** неразрушающего теплового контроля при исследовании полимерно-металлических изделий / Н.Ф. Майникова, А.Ю. Горбунова, Н.К. Калинина // Пластические массы. – 2020. – № 9 – 10. – С. 59 – 61.

Чернышова Т.И., Курносов Р.Ю.
Chernyshova T.I., Kurnosov R.Yu.

ФГБОУ ВО "Тамбовский государственный технический университет",
г. Тамбов

Tambov State Technical University, Tambov

Чернышова Татьяна Ивановна – д.т.н., профессор, профессор кафедры "Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем";
Курносов Роман Юрьевич – старший преподаватель кафедры "Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем".

Chernyshova Tatiana Ivanovna – doctor of engineering, Professor, Professor of the Department "Design of electronic and microprocessor systems"; **Kurnosov Roman Yurievich** – Senior Lecturer "Design of electronic and microprocessor systems".

Оценка метрологической надежности процессорных средств теплофизических измерений

Assessment of metrological reliability of processor means of thermophysical measurements

Ключевые слова: средства измерений; теплофизические измерения, метрологическая надежность, процессорные средства, аналого-цифровой преобразователь, погрешность.

Аннотация: приведены возможные пути оценки метрологической надежности процессорных средств теплофизических измерений, содержащих в своем составе аналого-цифровой преобразователь.

Key words: measuring instruments; thermophysical measurements, metrological reliability, processor facilities, analog-to-digital converter, error.

Abstract: possible ways of assessing the metrological reliability of processor means of thermophysical measurements containing an analog-to-digital converter are given.

Одной из важнейших характеристик качества средств измерений, в том числе процессорных средств (ПС) теплофизических измерений (ТФИ), является метрологическая надежность (МН). Для определения количественной оценки метрологической надежности средств измерений чаще всего используется показатель МН – метрологический ресурс (МР). Особое место в современной структуре процессорных средств

теплофизических средств измерений занимают блоки аналого-цифрового преобразования (АЦП). Такие блоки отличаются высокой точностью, быстродействием (временем преобразования), помехозащищенностью и рядом других свойств, определяемых в зависимости от назначения и функциональных возможностей процессорных средств, содержащих в своей структуре рассматриваемые блоки. Метрологическая надежность АЦП в значительной степени определяет результирующую метрологическую надежность процессорного средства теплофизических измерений в целом. Поэтому представляется достаточно важным определение путей решения задачи оценки МР как основного показателя метрологической надежности АЦП при решении задачи оценки МН процессорных средств ТФИ в целом.

Предлагается алгоритм оценки метрологического ресурса блока АЦП с учетом метрологических свойств составляющих этот блок модулей (цепь дифференциальной нагрузки и согласования (ДН), нормализующий усилитель (НУ), устройство формирования частоты (УФЧ)). В зависимости от постановки задачи оценки МН и ответственности выполняемых АЦП функций определение метрологической надежности аналого-цифрового преобразователя включает в себя два подхода. В основе каждого из них положен аналитико-вероятностный метод прогнозирования метрологической надежности, заключающийся в математическом моделировании нестационарных случайных процессов изменения во времени исследуемых метрологических характеристик средств измерений. На рисунке 1 представлена блок-схема реализации оценки МН АЦП, объединяющая два подхода. Первый подход, являющийся более оперативным, позволяет определить метрологический ресурс АЦП с учетом доминирующего влияния основного модуля в структуре аналого-цифрового преобразователя. При этом $t_p^{АЦП} = t_p^{ДМ}$. Достоинство этого подхода состоит в быстром получении результата по оценке МН.

Второй подход, являющийся более корректным, позволяет оценить выбранный показатель метрологической надежности блока АЦП, используя

для этого результаты расчета выбранного показателя МН для всех модулей, составляющих измерительный канал аналого-цифрового преобразователя. При этом

$$t_p^{АЦП} = \min \{t_p^{ДН}, t_p^{НУ}, t_p^{УФЧ}\}.$$

Достоинство этого подхода заключается в более высокой достоверности и точности оценки выбранного показателя МН.

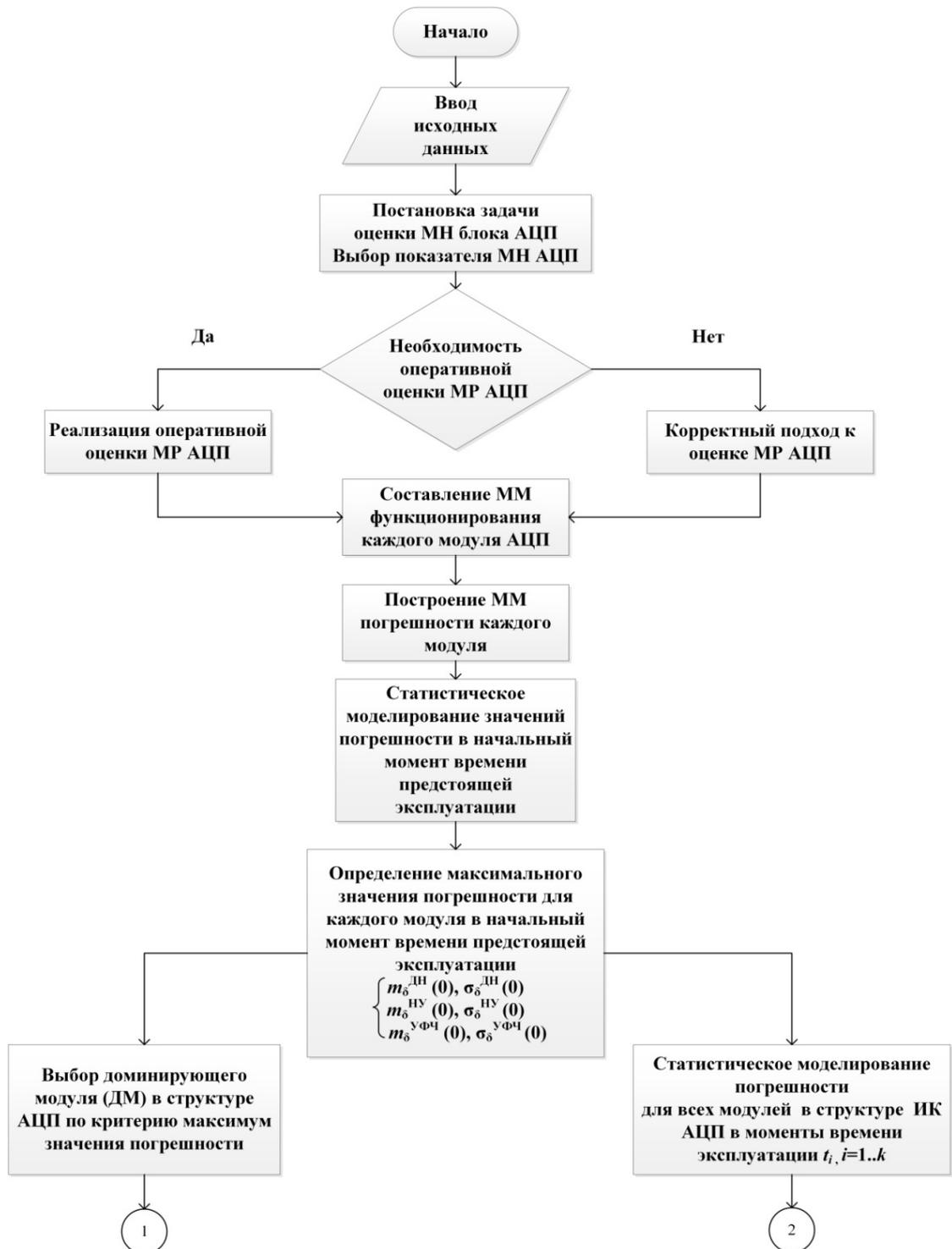


Рис. 1. блок-схема реализации оценки МН АЦП (начало).

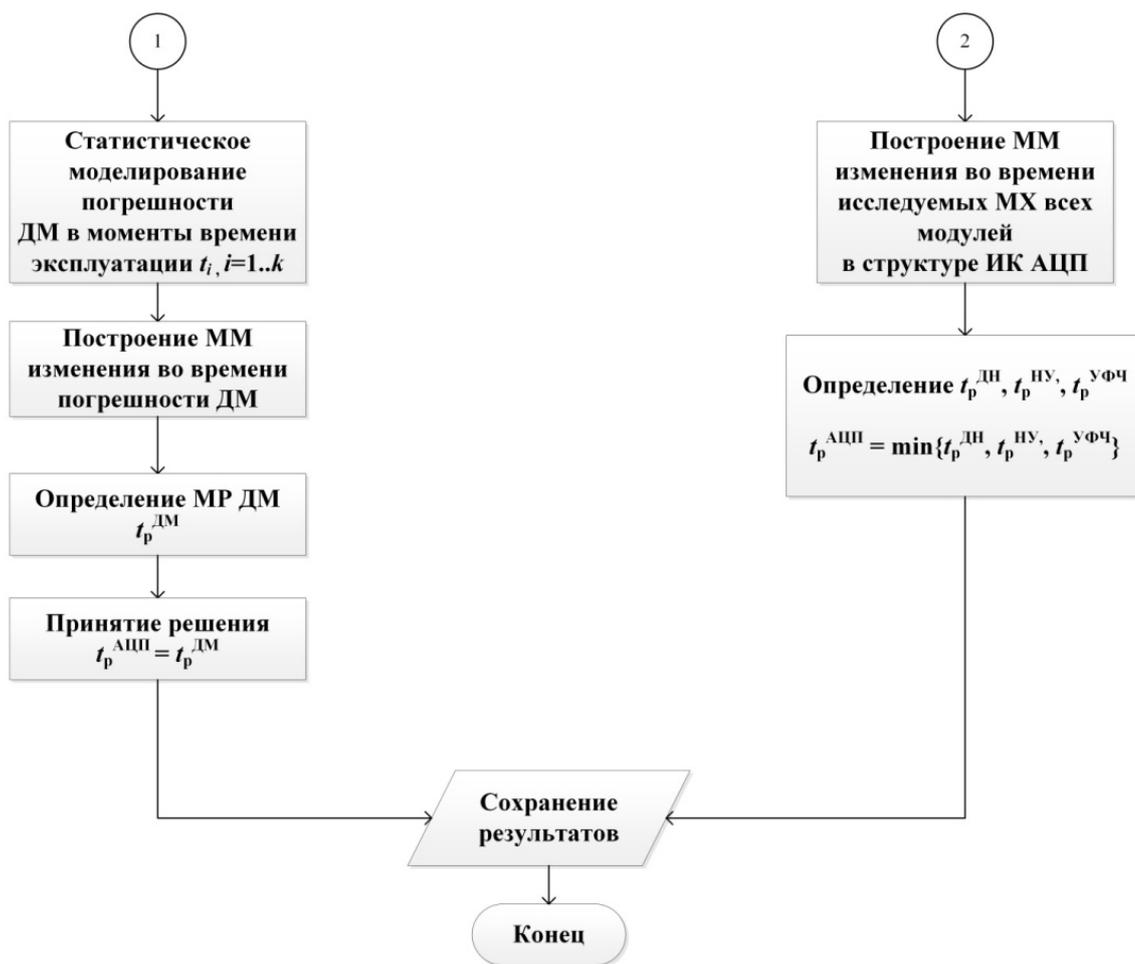


Рис. 1. Блок-схема реализации оценки МН АЦП (конец).

Таким образом, на основании сбора исходных данных о функциональном назначении и характеристиках блока АЦП в структуре процессорных средств ТФИ и проведенного анализа существует возможность на этапе проектирования выбрать один из представленных подходов с целью осуществления оперативной или корректной оценки метрологической надежности АЦП и в дальнейшем оценить требуемый показатель метрологической надежности для процессорных средств теплофизических измерений в целом.

Список литературы

1. **Мищенко С.В.** Метрологическая надежность измерительных средств / С.В. Мищенко, Э.И. Цветков, Т.И. Чернышова. – М.: Машиностроение, 2001. – 218 с.

2. **Kurnosov R.Yu.** Metrological Analysis of Analog-To-Digital Conversion Measurement Procedure in Information-Measuring and Control Systems / R. Yu. Kurnosov, T. I. Chernyshova, V. N. Chernyshov, M. A. Kamenskaya // Proceedings - 2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2020, 2020, pp. 61–64, 9280766.

3. **Чернышова Т.И.** Применение методов математического моделирования при оценке метрологической надежности блока аналого-цифрового преобразователя / Т.И. Чернышова, Р.Ю. Курносов, // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та – 2017. – Т.23, №4. – С.589-594.

4. **Муха Ю. П.** Погрешность датирования (сдвига) результатов измерений и ее связь с характеристиками интерфейса / Ю. П. Муха, Э. И. Цветков, И.Ю. Королева // Глобальная ядерная безопасность. – 2016. – № 2. – С. 50 – 58.

Попов О.Н., Майникова Н.Ф.
Ropov O.N., Mainikova N.F.

ФГБОУ ВО "Тамбовский государственный технический университет",
г. Тамбов

Tambov State Technical University, Tambov

Попов Олег Николаевич – к.т.н., доцент кафедры "Энергообеспечение предприятий и теплотехника"; **Майникова Нина Филипповна** – д.т.н., профессор, профессор кафедры "Энергообеспечение предприятий и теплотехника.

Ropov Oleg Nikolaevich – candidate of technical Sciences, docent of the Department " Power supply and heat engineering "; **Mainikova Nina Filippovna** – doctor of engineering, Professor, Professor of the Department "Power supply and heat engineering.

Метрологическая оценка погрешностей при неразрушающем контроле температуры структурного перехода в полимере

Metrological estimation of errors during non-destructive temperature control of a structural transition in a polymer

Ключевые слова: линейный источник тепла; метрологический анализ; погрешность.

Аннотация: Работа посвящена определению погрешностей результатов измерений значений температуры твердофазного перехода в поликапроамиде.

Key words: linear heat source, metrological analysis; measurement error.

Abstract: The work is devoted to determining the errors of the measurement results of the solid-phase transition temperature in polycaproamide.

Обеспечение высокой точности теплофизических измерений, которые проводятся измерительной системой (ИС), является важной задачей. Оценить погрешность и характеристики погрешностей результатов измерений можно с помощью метрологического эксперимента [1 – 3], для осуществления которого проведены теплофизические исследования на образцах из поликапроамида (ПА-6).

Известно, что в ПА-6 присутствует три фазовых перехода: около 0° С, при 25° С и при 225° С. Считается, что фазовый переход при температуре

25 °С обусловлен переходом одной кристаллической формы (гексагональная решетка) в другую кристаллическую форму (моноклинная решетка). Фазовый переход около 0 °С связан с вымерзанием молекулярно-нерастворенной – фазовой воды [4].

В данной работе при проведении метрологического эксперимента, который был осуществлен с помощью ИС, описание которой представлено в работе [5], определены погрешности конкретных результатов измерений значений температуры структурного перехода на материале ПА-6 при 25 °С.

Известно, что наиболее употребляемыми характеристиками погрешности являются: математическое ожидание (систематическая погрешность), корень квадратный из дисперсии (средняя квадратическая погрешность), доверительный интервал и доверительная вероятность [3].

Математическое ожидание погрешности позволяет получить информацию о постоянной составляющей погрешности (систематическая погрешность), создает предпосылки для ее коррекции. Математическое ожидание абсолютной погрешности:

$$M[\Delta T_j^*] = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \Delta T_j^* , \quad (1)$$

где m – количество опытов.

Средняя квадратическая погрешность абсолютной погрешности определения значения температуры перехода:

$$\sigma[\Delta T_j^*] = \left[\lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (\Delta T_j^* - M[\Delta T_j^*])^2 \right]^{\frac{1}{2}} . \quad (2)$$

Данная характеристика позволяет составить представление об интенсивности случайной погрешности и соотнести полученные данные с предъявляемыми требованиями.

Характеристики относительной погрешности определения значения температуры структурного перехода

$$M^*[\delta T_j^*] = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \delta T_j^* ; \quad (3)$$

$$\sigma^*[\delta T_j^*] = \left[\frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (\delta T_j^* - M^*[\delta T_j^*])^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

Предельные абсолютные и относительные погрешности:

$$\Delta_{\text{пред}} T_j^* = M[\Delta T_j^*] + t_{\alpha, m-1} \sigma[\Delta T_j^*]; \quad (5)$$

$$\delta_{\text{пред}} T_j^* = \frac{\Delta_{\text{пред}} T_j^*}{T_{\text{п}}}. \quad (6)$$

Здесь $t_{\alpha, m-1}$ – коэффициент Стьюдента при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ и количестве измерений, $m - 1$; $T_{\text{п}}$ – температура структурного перехода, °С.

Результаты теплофизического эксперимента, реализующего определение значения температуры структурного перехода в ПА-6, приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты эксперимента на ПА-6.

№	$T_{\text{п}i}^*$	№	$T_{\text{п}i}^*$	№	$T_{\text{п}i}^*$
1	25,3	11	27,0	21	24,7
2	25,6	12	24,3	22	26,0
3	24,3	13	25,1	23	25,4
4	25,0	14	27,0	24	25,6
5	27,1	15	25,3	25	24,8
6	24,3	16	25,6	26	25,2
7	27,1	17	24,4	27	26,2
8	25,5	18	23,0	28	24,3
9	25,5	19	24,2	29	25,4
10	24,0	20	26,6	30	25,1

Теплофизические измерения, результаты которых отображены в табл. 2, проведены при следующих условиях: временной шаг измерения температуры $\Delta\tau = 0,3$ с; материал подложки зонда – ПТФЭ; толщина подложки зонда – 0,02 м; толщина исследуемой пластины (объекта исследования) из ПА-6 – 0,0185 м. Температура начала теплофизических измерений $T_{\text{п}} = 19,5$ °С.

Результаты обработки экспериментов, проведенных на изделии, изготовленном из ПА-6, представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты метрологической обработки эксперимента.

Погрешности и характеристики погрешностей измерений	Материал ПА-6
$M[\Delta T_j^*]$	0,810
$\sigma[\Delta T_j^*]$	0,640
$M^*[\delta T_j^*]$	0,032
$\sigma^*[\delta T_j^*]$	0,026
$\Delta_{\text{пред}} T_j^*$	0,850
$\delta_{\text{пред}} T_j^*$	0,034

Таким образом, действительные метрологические характеристики ИС, полученные нами экспериментально, соответствуют требованиям, предъявляемым к неразрушающему контролю структурных превращений в полимерных материалах.

Список литературы

1. **Сергеев О.А.** Метрологические основы теплофизических измерений. – М.: Изд-во стандартов, 1972. – 154 с.
2. **Герасимович А.И.** Математическая статистика. – Минск: Высш. школа, 1983. – 279 с.
3. **Сергеев А.Г.** Метрология / А.Г. Сергеев, В.В. Крохин. – М.: Логос, 2001. – 408 с.
4. **Бартенев Г.М.** Релаксационные свойства полимеров / Г.М. Бартенев, А.Г. Бартенева. – М.: Химия, 1992. – 384 с.
5. **Неразрушающий** теплофизический контроль структурных переходов в полимерных материалах/ С.В. Мищенко, Н.Ф. Майникова, О.Н. Попов, Д.О. Завражин // «Информационно-сенсорные системы в теплофизических исследованиях» XI Междунар. конф.: сб. научн. ст. – Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2018. – Т. I. – С. 269 – 273.

Конакова Ю.М., Малышева А.В., Гребенникова Н.М.
Konakova Y.M., Malysheva A.V., Grebennikova N.M.

ФГБОУ ВО "Тамбовский государственный технический университет",
г. Тамбов

Tambov State Technical University, Tambov

Конакова Юлия Михайловна – "Тамбовский государственный технический университет", студент, направление 27.03.02; **Малышева Алина Васильевна** – "Тамбовский государственный технический университет", студент, направление 27.03.02; **Гребенникова Наталия Михайловна** – к.т.н, доцент каф. «Мехатроника и технологические измерения».

Konakova Yulia Mikhailovna - "Tambov State Technical University", student, direction 27.03.02; **Malysheva Alina Vasilevna** - "Tambov State Technical University", student, direction 27.03.02.; **Grebennikova Natalia Mikhailovna** - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Faculty. "mechatronics and technological measurements".

Система менеджмента качества на малых предприятиях

Systems of quality management in enterprises

Ключевые слова: менеджмент качества; управление качеством; сертификация продукции; требования ISO; система качества; малые предприятия.

Аннотация: Рассмотрены особенности системы менеджмента качества на малых предприятиях, представлены конкретные примеры.

Key words: quality management; quality management; product certification; ISO requirements; quality system; small enterprises.

Abstract: The features of the quality management system at small enterprises are considered, competitive examples are presented.

Система менеджмента качества (СМК) — это способ, с помощью которого организация направляет и управляет теми видами деятельности, которые связаны (вне зависимости от того, прямо или косвенно) с достижением намеченных результатов [1].

Сертификация системы менеджмента качества на соответствие ИСО 9001 в настоящее время имеет большое распространение в России. Все увеличивающееся число предприятий выбирает сертификацию как

эффективный способ повышения конкурентоспособности на рынке. Стандарты на системы качества позволяют оценить способность того или иного поставщика удовлетворять требования потребителей. Требования ISO 9001 являются общими и предназначены для применения любыми организациями, независимо от их типа или размеров, производимой продукции и оказываемых услуг. Однако стоит отметить, что структура проектов совершенствования СМК малых предприятий может существенно отличаться от структуры проектов внедрения СМК на крупных предприятиях. И если для крупных и средних предприятий, ориентированных на экспорт продукции, добровольная сертификация — predetermined procedural action, то малые предприятия взвешивают выгоды и издержки внедрения СМК. В пользу сертификации СМК в первую очередь говорит тот факт, что тенденции рынка товаров и услуг уже демонстрируют потребность исключительно в сертифицированных товарах. Кроме того, политика вступления России в ВТО предполагает программу оказания помощи малым предприятиям при сертификации СМК. Помимо вышеперечисленного, сертифицированная система менеджмента качества на предприятии повышает имидж компании, дает конкурентное преимущество при участии в конкурсах, выставках, а также снижает долю производственного брака на 25% и более [1].

Отметим, что в зависимости от отрасли, малые предприятия имеют разную численность. Как правило, это организация численностью не более 50 человек. Но в отдельных отраслях малым предприятием считается компания, где работает не более 100 человек или не более 250 человек [1].

Внедрение СМК на малом предприятии можно условно разделить на несколько этапов [1].

1. Решение руководителя.
2. Обучение персонала.
3. Формирование программы внедрения СМК.
4. Оптимизация бизнес-процессов.

5. Разработка нормативных документов.
6. Непосредственно внедрение СМК.
7. Оценка степени внедрения СМК.
8. Получение сертификата.

Стандартом, определяющим требования к системе менеджмента качества в настоящее время в России, является ГОСТ Р ИСО 9001–2015 «Системы менеджмента качества. Требования». Также для малых предприятий разработаны руководящие указания ГОСТ Р 54985-2018 «Руководящие указания для малых организаций по внедрению системы менеджмента качества на основе ИСО 9001:2015» [3].

Что влияет на решение и что может дать сертификация малому предприятию?

Внешние причины:

1. Мобильность при выходе на рынок благодаря их конкурентным преимуществам - гибкости реакции на спрос, оперативности.
2. Государственная поддержка предприятий малого бизнеса, внедряющих системы менеджмента качества.
3. Улучшение имиджа предприятия.
4. Работает на заемные средства и зависит от кредитных организаций сильнее средних и крупных предприятий [2].

Внутренние причины:

1. Рост может быть резким за счет обзримости нуждающихся в реинжиниринге процессов, возможности быстрого и кардинального улучшения.
2. Персонал имеет широкий круг обязанностей, часто ненормированных.
3. Способно внедрить тотальный контроль качества без значительных издержек на его осуществление.
4. Использование маркетинга не как сбыта продукции, а как способа узнать, какой должна быть продукция, чтобы ее купили [2].

Примеры малых предприятий РФ с сертифицированной системой менеджмента качества по требованиям ГОСТ Р ИСО 9001–2015.

- ООО «НТП «ТКА» - производство и обслуживание измерительных приборов, оборудования и продукции, прочих работ и услуг.

- АО «БЕЛТЕЛ» - производство и сервисное обслуживание аппаратного и программного обеспечения в области телекоммуникаций, информационных технологий, слаботочных инженерных систем и подготовка обслуживающего персонала.

- ООО «Насос-Центр» - поставка насосного оборудования.

Вывод.

В настоящий момент, несмотря на преимущества системы менеджмента качества по требованиям ГОСТ Р ИСО 9001–2015, которые по праву считаются обобщенными для использования практически в любой сфере деятельности, ещё достаточно немного малых предприятий разрабатывают и сертифицируют СМК.

Список литературы

1. **Ахметов И.Г.** Молодой учёный [Текст]: международный научный журнал. Часть 2. / И. Г. Ахметов. – Казань: Издательство: ООО «Издательство Молодой ученый». – 2017, Т.500, № 18 (152). – С. 187 – 189.

2. **Бринк И.Ю., Редько Ю.В.** Внедрение стандартов серии ИСО 9000 на малом предприятии как способ повышения его конкурентоспособности [Электронный ресурс]: статья / И. Ю.Бринк, Ю. В. Редько – Режим доступа: <https://quality.eur.ru/MATERIALY11/smk-smally.htm>.

3. **Автор** ОАО «ВНИИС». Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р ИСО 9001 – 2015 [Электронный ресурс]: Настоящий стандарт / Автор ОАО «ВНИИС» - Москва: Издательство: «Стандартинформ». – 2015 - Режим доступа: https://2i.tusur.ru/wp-content/uploads/2018/12/ISO_9001_2015.pdf.

Хворова К.С., Гребенникова Н.М.
Khvorova K.S., Grebennikova N.M.

ФГБОУ ВО "Тамбовский государственный технический университет",
г. Тамбов

Tambov State Technical University, Tambov

Хворова Ксения Сергеевна – магистрант направления 27.04.02 «Управление качеством», программа магистратуры «Технологии бережливого производства и менеджмент качества»; **Гребенникова Наталия Михайловна** – к.т.н., доцент кафедры «Мехатроника и технологические измерения».

Khvorova Kseniya Sergeevna – master's student of the direction 27.04.02 "Quality Management", master's program "Lean manufacturing technologies and quality management"; **Grebennikova Natalia Mikhailovna** - candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Mechatronics and Technological Measurements.

**К проблеме управления качеством видеоконтента для
образовательного процесса**

**On the problem of quality management of video content for the
educational process**

Ключевые слова: видеостудия Jalinga, презентация, видеоконтент, образование.

Аннотация: Рассмотрены основные особенности записи образовательных видео в видеостудии Jalinga.

Key words: Jalinga Studio, presentation, video content, education.

Abstract: The main features of recording educational videos in the Jalinga Studio are considered.

Сегодня трудно представить свою жизнь без цифровых технологий. Образовательная сфера – не исключение: в 2020 году в связи с распространением новой коронавирусной инфекции школы и университеты были вынуждены перейти в электронный формат обучения (online), состоящий в основном из видеоконтента.

Во многих ВУЗах, например, в ТГТУ, такая система обучения используется сейчас для некоторых форм обучения, а также при

неблагоприятных ситуациях в отдельных группах по заболеваемости. Как правило, для видеолекций или онлайн видеоконференций чаще всего используются обычные презентации, созданные в Microsoft Power Point. Однако, такие презентации статичны, что приводит к низкой вовлеченности студентов в образовательный процесс.

Для решения данной проблемы и улучшения качества образовательного видеоконтента в ТГТУ был установлен программно – аппаратный комплекс Jalinga.

Jalinga Studio - программа для записи видео и проведения видеоконференций.

Данная программа имеет ряд преимуществ:

1. Возможность сделать видеоконтент более «живым»: видеостудия оснащена сенсорной доской, на которой можно писать, рисовать, добавлять различные объекты (картинки, анимации, карты, браузер и видео) и взаимодействовать с ними. Интерактивные презентации повышают интерес студентов к материалу, изложенному в них.

2. Наличие телесуфлера.

3. Высокое качество видеозаписи благодаря инновационному оборудованию.

С целью выявить недостатки этого ПО, а также условий проведения записи, был проведен опрос преподавателей, которые использовали Jalinga Studio для записи видеолекций. Основными недостатками, выявленными в ходе опроса, были указаны: повышенная температура воздуха в видеостудии, длительная подготовка к записи интерактивного видео, отсутствие возможности заранее создать презентацию Jalinga Studio на более слабом ПК. Полученные данные были сведены в таблицу 1 и представлены с помощью диаграммы Парето на рисунке 1. Диаграмма Парето – разновидность столбиковой диаграммы, применяемой для наглядного отображения рассматриваемых факторов в порядке уменьшения (возрастания) их значимости [1].

Таблица 1 – Результаты регистрации данных по видам недостатков использования видеостудии Jalinga в ТГТУ.

№ п/п	Типы недостатков	Число респондентов, отметивших недостаток	Накопленная сумма числа респондентов, отметивших недостаток	Процент числа респондентов, отметивших недостаток к общей сумме, %	Накопленный процент, %
1	Повышенная температура воздуха в видеостудии	22	22	73	73
2	Длительная подготовка к записи интерактивного видео	5	27	17	90
3	Отсутствие возможности заранее создать презентацию JalingaStudio на более слабом ПК	3	30	10	100
ИТОГО		30		100	



Рис. 1 – Диаграмма Парето по видам недостатков использования видеостудии Jalinga в ТГТУ.

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что одна из главных проблем - повышенная температура воздуха в видеостудии. Микроклимат в студии действительно важный аспект, влияющий на качество видеоконтента. В душном помещении лектору будет некомфортно находиться, труднее излагать материал и вносить какой-либо интерактив в свою лекцию, чтобы повысить вовлеченность студентов.

В дальнейшем, используя инструменты управления качеством и бережливого производства, можно будет устранить обнаруженные недостатки или уменьшить их влияние на создание образовательного видеоконтента.

Список литературы

1. **Пономарев С.В.** Управление качеством процессов и продукции. Инструменты и методы менеджмента качества процессов в производственной, коммерческой и образовательной сферах: Учебное пособие / С.В. Пономарев, Г.А. Соседов, Е.С. Мищенко, и др,- Тамбов., Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ».-2012 – 212 с.

Дмитриев О.С., Барсуков А.А.
Dmitriev O.S., Barsukov A.A.

ФГБОУ ВО "Тамбовский государственный технический университет",
г. Тамбов

Tambov State Technical University, Tambov

Дмитриев Олег Сергеевич – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Физика»; **Барсуков Александр Андреевич** – аспирант кафедры «Физика».

Dmitriev Oleg Sergeevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Physics Department; **Barsukov Aleksandr Andreevich** – postgraduate student of the Physics Department.

Метрологическая оценка метода определения кинетических характеристик полимерных композитов при отверждении

Metrological estimation of the method for determining the kinetic characteristics of polymer composites during curing

Ключевые слова: кинетические характеристики; метрологический анализ; полимерные композиты; погрешности.

Аннотация: Проведен анализ источников и оценка погрешностей при определении кинетических характеристик процесса отверждения полимерных композитов для выбора оптимальных условий проведения эксперимента.

Key words: kinetic characteristics; metrological analysis; polymer composites; errors.

Abstract: The analysis of sources and estimation of errors in determining the kinetic characteristics of the polymer composites curing process to select the optimal conditions for the experiment are carried out.

Экспериментальное исследование кинетических характеристик процесса отверждения полимерных композитов всегда сопряжено с появлением погрешностей, которые являются следствием различных причин и явлений. Основной причиной этих погрешностей являются условия проведения эксперимента [1]. Поэтому целью работы является анализ источников и оценка погрешностей с целью выбора оптимальных условий проведения экспериментов, минимизирующих погрешности определения кинетических характеристик полимерных композитов при отверждении.

Метод определения кинетических характеристик процесса отверждения композитов, относится к косвенному методу измерений. В процессе эксперимента непосредственно измеряется не сама интересующая нас величина, а другие величины, к которым относятся температура T , толщина образца L , мощность тепловыделений W и т.п. Зная значения этих физических величин, искомые величины определяются на основе математической модели, используемой для получения метода измерения.

Мощность тепловыделений W , используемая как входная величина при определении кинетических характеристик, сама определяется косвенно, т.е. рассчитывается по результатам измерения температуры T , теплового потока q , толщины L , теплоемкости C , теплопроводности λ и производной температуры T' . В свою очередь, все эти величины также не являются непосредственно измеряемыми величинами, а определяются по своим расчетным формулам, градуировочным характеристикам и уравнениям. Как следует из работы [1], в этом случае рекомендуется подставить в исходную формулу погрешности, соответствующие выражения погрешностей всех косвенно измеряемых величин, и тем самым добиться, чтобы искомая величина зависела только от величин, измеряемых прямым методом. Это неизбежно приведет к чрезвычайно сложным и трудно используемым на практике выражениям. Поэтому оценку погрешностей кинетических характеристик целесообразно проводить с некоторым упрощением, используя входящие в них величины как величины, полученные прямым измерением с соответствующими погрешностями.

Исходными данными формул определения кинетических характеристик являются среднеинтегральная температура T_{cp} , мощность тепловыделений W , полный тепловой эффект $Q_{п}$ и универсальная газовая постоянная R . Температура T_{cp} является величиной измеренной экспериментально, но полученная с помощью градуировочной характеристики термопары и последующего интегрирования. Поэтому среднеинтегральную температуру, в некотором смысле, можно считать косвенным измерением, полученным в

результате пересчетов по соответствующим формулам. На основе расчетных формул определения кинетических характеристик с применением теории погрешностей, получены оценки среднеквадратичных относительных погрешностей δ_E , δ_φ определения энергии активации E и кинетической функции φ .

Погрешность определения φ получена для натурального логарифма кинетической функции $\ln\varphi$, т.к. кинетическая функция выражает экспоненциальную зависимость скорости химической реакции от степени отверждения β и при увеличении β от 0 до 1 изменяется на несколько порядков, например, с 10^{10} до 10^{-2} с^{-1} . Кроме того, кинетическая функция φ получена в результате решения системы линейных уравнений в полулогарифмических координатах. Поэтому при оценке погрешностей определения кинетической функции φ необходимо исследовать влияние погрешностей исходных данных не на саму функцию φ , а на ее натуральный логарифм $\ln\varphi$.

Численный анализ формул погрешностей определения кинетических характеристик позволяет сделать вывод, что относительная погрешность E_μ существенно зависит от разности начальной и текущей толщины $L(0)-L(t)$, разности температур T_2-T_1 и отношения скоростей изменения толщины образцов L'_1/L'_2 . Причем двумя последними параметрами можно управлять в процессе экспериментального исследования и планировать эксперименты так, чтобы минимизировать погрешность определения E_μ при фиксированных погрешностях δ_T и δ_L . Разность начальной и текущей толщины $L(0)-L(t)$ увеличивается во времени в процессе исследования и зависит только от природы исследуемых материалов.

Таким образом, на основе метрологического анализа источников погрешностей была сформулирована задача поиска оптимальных условий проведения экспериментальных исследований по определению кинетических характеристик процесса отверждения полимерных композитов, позволяющая

найти такие значения условий экспериментов, чтобы погрешность их была минимальной.

Задача решалась двумя методами, методом имитационного моделирования и методом построения нейронной сети.

В результате решения этой задачи были получены рекомендации по выбору оптимальных условий проведения экспериментов исследования процесса отверждения полимерных композитов.

Предложенные процедуры имитационного и нейросетевого моделирования вошли в состав информационно-измерительной системы исследования теплофизических и кинетических характеристик, обеспечивая минимизацию погрешности их определения, которые необходимы для расчета оптимальных режимов отверждения изделий из полимерных композитов [2].

Список литературы

1. **Грановский В.А.** Методы обработки экспериментальных данных при измерениях / В.А. Грановский, Т.Н. Сирая - Л.: Энергоатомиздат, 1990.- 328 с.
2. **Дмитриев О.С.** Измерительно-вычислительная система для исследования свойств клеевых препрегов и расчета режимов отверждения ПКМ на их основе / О.С. Дмитриев, В.Н. Кириллов, С.В. Мищенко, А.О. Дмитриев // Клеи. Герметики. Технологии. –2009. № 6. – С. 22-28.

Сенкевич А.Ю.
Senkevich A.Yu.

ФГБОУ ВО "Тамбовский государственный технический университет",
г. Тамбов

Tambov State Technical University, Tambov

Сенкевич Алексей Юрьевич – к.т.н., доцент кафедры "Мехатроника и технологические измерения".

Senkevich Alexey Yuryevich – candidate of technical Sciences, docent of the Department "Mechatronics and technological measurements".

Алгоритм определения количества измерений при неразрушающем тепловом контроле

Algorithm for determining the number of measurements during non-destructive thermal control

Ключевые слова: теплофизические свойства; тепловые измерения, неразрушающий контроль, теплопроводность.

Аннотация: Рассмотрен подход к повышению точности экспериментального исследования теплофизических свойств твердых теплоизоляционных материалов и алгоритм определения требуемого количества последовательных многократных измерений.

Key words: thermophysical properties; thermal measurements, non-destructive testing, thermal conductivity.

Abstract: An approach to improving the accuracy of the experimental study of the thermophysical properties of solid thermal insulation materials and an algorithm for determining the required number of consecutive multiple measurements are considered.

Контактные тепловые методы неразрушающего контроля позволяют определять теплофизические свойства твёрдых материалов по отклику на тепловое воздействие от нагревателя определённой формы.

Повышение качества и надежности производства и эксплуатации изделий из твердых теплоизоляционных материалов непосредственно связано с контролем их теплофизических свойств, проводимым как в лабораторных, так и производственных условиях. Решение этой проблемы имеет большое значение для современного и будущего научно-технического развития. В

практике исследования теплофизических свойств твердых материалов наибольшее распространение и развитие получили тепловые методы неразрушающего контроля, характеризующиеся высокой оперативностью и экономичностью, при этом предпочтение отдается тем из них, которые наиболее полно используют экспериментальную информацию для определения комплекса теплофизических свойств. Это позволяет повысить точность и производительность выполняемых измерений.

Наиболее эффективным способом получения надежных и достоверных результатов теплофизического контроля является проведение определенного количества идентичных экспериментов. Оперативность неразрушающего контроля при этом можно повысить заменой серии длительных тепловых измерений одним многостадийным управляемым экспериментом, основанным на учете неравномерного начального распределения температуры на каждой стадии и реализованным на базе средств современной измерительно-вычислительной техники, обеспечивающих автоматизацию обработки первичной информации и управления ходом процесса контроля.

С этой целью разработан многостадийный метод и создана автоматизированная система теплофизического неразрушающего контроля, обеспечивающие эффективное (точное и достоверное) определение комплекса теплофизических свойств за счет оперативного проведения многократных однотипных измерений, состоящих из чередующихся управляемых по времени и мощности нагрева стадий эксперимента: нагрева и остывания.

Одним из наиболее важных моментов метрологической проработки разработанного многостадийного метода явилось создание алгоритма нахождения требуемого числа измерений n (рис.), обеспечивающих определение теплопроводности λ и температуропроводности a исследуемого материала с абсолютными ошибками, не превышающими значения Δ_λ и Δ_a , соответственно.

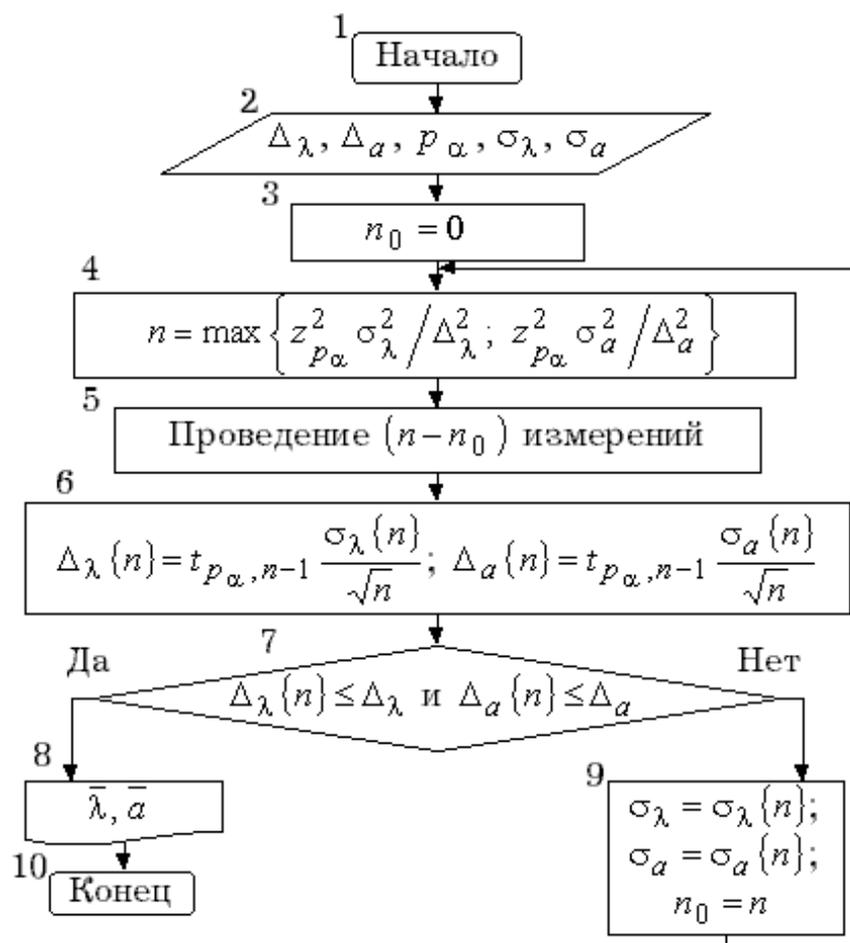


Рис. 1. Блок-схема алгоритма определения необходимого числа стадий.

При реализации данного алгоритма на втором шаге (рис.) задаются значения выборочных среднеквадратических отклонений σ_λ и σ_a , оценка которых выполняется на основании экспериментальных зависимостей. Далее проводится n измерений, по результатам которых уточняются значения $\sigma_\lambda\{n\}$ и $\sigma_a\{n\}$, а по достижении заданной точности измерения заканчиваются. На рис. z_{p_α} и $t_{p_\alpha, n-1}$ - значения квантиля нормального распределения и критерия Стьюдента для заданной доверительной вероятности p_α ; n_0 - проведенное число измерений.

Использование данного алгоритма в информационно-измерительной системе многостадийного неразрушающего контроля позволяет определять необходимое и достаточное число измерений (стадий) в процессе проведения эксперимента.

Список литературы

1. **Чуриков А.А., Сенкевич А.Ю.** Многостадийный метод и информационно-измерительная система неразрушающего теплового контроля теплофизических свойств твердых теплоизоляционных материалов // Приборы. - 2009. - № 6. - С. 23 - 26.
2. **Шор Я.Б.** Статистические методы анализа и контроля качества и надежности. - М.: Сов. радио, 1962. - 552 с.

Сумин В.И.¹, Смоленцева Т.Е.²
Sumin V.I.¹, Smolentseva T.E.²

¹ФКОУ ВО «Воронежский институт Федеральной службы исполнения наказаний», Россия, Воронеж; ²ФГБОУ ВО МИРЭА-Российский технологический университет (РТУ МИРЭА), Россия, Москва

¹Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service", Russia, Voronezh;

²Russian Technological University (RTU MIREA), Russia, Moscow

Аспекты реализации управления качеством в производственных системах

Aspects of the implementation of quality management in production systems

Ключевые слова: информационная система, управление качеством, тестирование систем.

Аннотация: В работе рассмотрены основные этапы оценки качества систем. Проанализированы программные продукты, связанные с тестированием в производственных системах по критериям: производительность системы, область применения и скорость обработки входных данных. Описан процесс формирования единой базы данных результатов тестирования изделий.

Key words: information system, quality management, system testing.

Abstract: The paper considers the main stages of assessing the quality of systems. Software products related to testing in production systems are analyzed according to the criteria: system performance, application areas and input data processing speed. The process of forming a unified database of product testing results is described.

Качество информационных систем (ИС) связано с дефектами, заложенными на этапе проектирования и проявляющимися в процессе эксплуатации. Свойства ИС, в том числе и дефектологические, могут проявляться лишь во взаимодействии с внешней средой, включающей технические средства, персонал, информационное и программное окружение.

В зависимости от целей исследования и этапов жизненного цикла ИС дефектологические свойства разделяют на дефектогенность, дефектабельность и дефектоскопичность рис. 1.

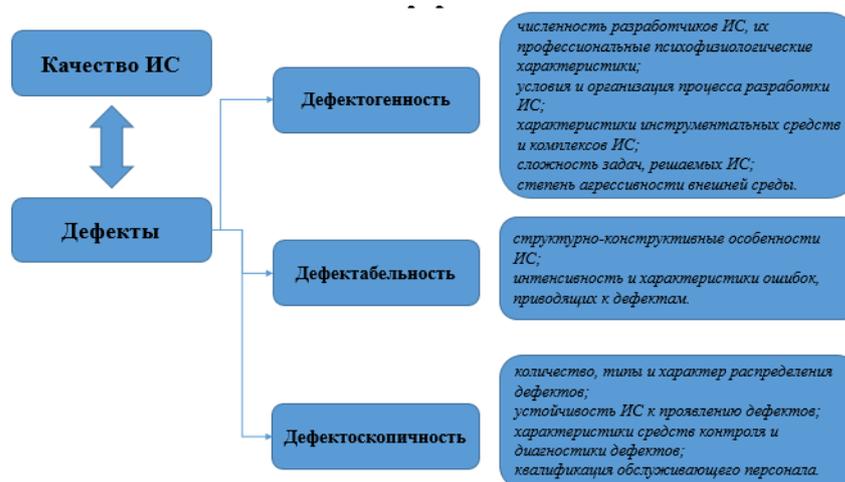


Рис.1. - Схема оценки качества ИС.



Рис. 2. - Стадии процесса управления качеством.

Стадии процесса управления качеством можно представить в виде следующей схемы рис. 2.

Если рассматривать задачу управления качеством в производственных системах, безусловно, процесс реализации тестирования является ключевым [1].

Рынок систем производственного тестирования невелик и довольно специфичен. Каждое решение отличается по реализации и применению. Рассмотрим наиболее близкие по функционалу системы производственного тестирования вычислительной техники.

Компания National Instruments является лидером в технологиях аппаратно-программных решений для систем тестирования, автоматизации

измерений, диагностики, управления и моделирования в широком спектре приложений. Компания осуществляет производство и тестирование собственных изделий, а также автоматические измерения физических характеристик изделия.

TestStand представляет собой специализированное программное обеспечение, которое помогает разрабатывать, отлаживать и развертывать тестовые системы, а также обеспечивает полную видимость процесса и результатов тестирования. Оно разработано для быстрой автоматизации процедуры проведения испытаний, с использованием программных тестов. TestStand предназначено для инженеров–испытателей, работающих на языках программирования C++, G (в программе LabVIEW) и других. Среда Test Stand оснащена комплексными инструментами конфигурации, с помощью которых есть возможность изменять и персонализировать пользовательский интерфейс, а также производить генерацию отчетов и настраивать последовательность выполнения тестов [2].

Программная платформа для автоматизации испытаний (Test Automation Platform, TAP) компании Keysight позволяет создавать мощные, гибкие и расширяемые тестовые последовательности и планы тестирования с дополнительными возможностями, которые оптимизируют разработку программного обеспечения (ПО) для испытаний и обеспечивают общее повышение производительности. Keysight TAP является современным приложением на базе архитектуры NET компании Microsoft, которое можно использовать автономно или в комбинации с программными средами управления испытаниями более высокого уровня.

Еще одна система близкая к рассматриваемым задачам – это ПО для тестирования полупроводников Activ ATE Test Management Software. Используя ActivATE, можно создавать и запускать программы тестирования полупроводников в автоматизированных системах. Система упрощает процесс автоматизированного тестирования благодаря простому интерфейсу пользователя.

Результаты сравнений систем производственного тестирования представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Сравнение систем производственного тестирования.

Название системы	TestStand	Keysight TAP	ActivATE
Производитель	National Instruments	Microsoft	Astronics
Язык программирования тестов	C++, G	C#, TAP	C#, VB.NET, or VBScript
Требования к работе в системе	Разработка на языке G в специализированной программе LabVIEW	Разработка этапов испытаний в среде Microsoft .NET и Microsoft Visual Studio	Разработка в ASP.NET, закрытое использование
Сложность работы в системе	Требует серьезного обучения	Требует обучения	Требует обучения
Области применения	Автомобильная электроника, Цифровые и фотонные устройства, Аэрокосмические и оборонные системы	Системы беспроводной связи, Автомобильная электроника, Цифровые и фотонные устройства, Аэрокосмические и оборонные системы	Тестирование полупроводников

Одним из основных вопросов среди проанализированного ПО является реализация возможности запуска каждого программного теста отдельно. После проведения выполнения тестов, инженеру нужно в ручном режиме сохранять результаты теста (лога), а также вести их учет.

Также процесс характеризуется отсутствием возможности видеть общую картину тестирования, а именно:

- отсутствие полного списка тестов на исполнение текущего сценария тестирования;
- отсутствие наглядной картины выполнения теста в режиме реального времени – ручной и визуальный поиск ошибок в каждом тесте;
- результаты тестов не сохраняются – отсутствие единого информационного пространства с историей проводимых тестов изделия [3, 4].

Для решения данной проблемы необходимо обеспечить общую базу данных тестов на изделие, а также группы тестов по видам испытаний, непрерывный сбор и анализ данных о выполнении и по завершению теста, а также сохранение результатов проверки в БД. Это позволит повысить эффективность процесса проведения как одного теста, так и процесса тестирования изделия в целом. Кроме того, анализ результатов теста и их учет необходим для дальнейшего незамедлительного прогнозирования и принятия управленческого решения о прохождении этапа испытания изделия.

Список литературы

1. **Александр Кузин**, Левонисова С.В. Базы данных. Москва: Изд-во Академия. 2012.
2. **Дворецкий С.И.**, и др. Компьютерное моделирование технологических процессов и систем. Учебное пособие - Тамбов: ТГТУ. 2006.
3. **Кэмпбелл Лейн**, Мейджорс Черити. Базы данных. Инжиниринг надежности. Санкт-Петербург: Изд-во Питер. 2020.
4. **Sumin V.I.**, Smolentseva T.E., Belokurov S.V., Lankin O.V. Information model of trainee characteristics with definition of stochastic behavior of dynamic system. International Conference "Applied Mathematics, Computational Science and Mechanics: Current Problems", Journal of Physics: Conference Series. ISSN: 1742-6588, 012047;19 March 2018.

Беляев В.П., Мищенко С.В., Беляев П.С.
Belyaev V.P., Mishchenko S.V., Belyaev P.S.

ФГБОУ ВО "Тамбовский государственный технический университет",
г. Тамбов

Tambov State Technical University, Tambov

Беляев Вадим Павлович – к.т.н., младший научный сотрудник Управления фундаментальных и прикладных исследований; **Мищенко Сергей Владимирович** – д.т.н., профессор, Советник при ректорате; **Беляев Павел Серафимович** - д.т.н., профессор, профессор кафедры "Материалы и технология".

Belyaev Vadim Pavlovich – candidate of technical Sciences, junior researcher; **Mishchenko Sergey Vladimirovich** - doctor of engineering, Professor, Rector's Office Counselor; **Belyaev Pavel Serafimovich** - doctor of engineering, Professor, Professor of the Department "Materials and Technologies".

**Метрологический анализ метода неразрушающего контроля
коэффициента диффузии в тонколистовых анизотропных пористых
материалах**

**Metrological analysis of the method of non-destructive testing of the
diffusion coefficient in thin-sheet anisotropic porous materials**

Ключевые слова: неразрушающий контроль; анизотропный тонколистовой пористый материал; коэффициент диффузии, линейный источник; метрологический анализ; погрешность.

Аннотация: Рассмотрен метрологический анализ нового метода неразрушающего контроля коэффициента диффузии в тонколистовых анизотропных пористых материалах.

Key words: non-destructive testing; anisotropic thin-sheet porous material; diffusion coefficient; linear source, metrological analysis; measurement error.

Abstract: The metrological analysis of a new method of non-destructive testing of the diffusion coefficient in thin-sheet anisotropic porous materials is considered.

Широкое распространение в области теплофизических исследований получали контактные тепловые методы неразрушающего контроля (НК), обеспечивающие оперативный контроль теплопроводности, коэффициента температуропроводности и теплоемкости при наличии возможности доступа к плоским участкам изделий заданных размеров [1]. Эти методы позволяют

получать оперативные данные по теплопроводности, коэффициенту температуропроводности и теплоемкости изделий на основе откликов на импульсные тепловые воздействия различной конфигурации [1].

Затруднения при создании высокопроизводительных методов НК характеристик массопереноса объясняются, прежде всего, особенностями измерения локальных значений концентрации распределенных в твердой фазе диффундирующих веществ после нанесения импульсных воздействий дозой диффузанта:

1) сложностью локализации контроля концентрации диффузанта строго на заданных расстояниях от источника по сравнению с измерением локальной температуры [2];

2) необходимость предварительной градуировки применяемого преобразователя концентрации по каждому пористому материалу и диффузantu, исключающая возможность получения оперативного метода, т.к. ее проведение требует значительных затрат времени [3].

Существенные осложнения возникает при явно выраженной анизотропии свойств тонколистовых изделий, например, вдоль и поперек расположения волокон пористого материала.

Известен метод, представленный нами в [4], позволяющий проводить контроль без использования предварительно найденной статической характеристики гальванического преобразователя, используя ее монотонность. Данный метод основан на контроле момента достижения максимума выходной характеристики преобразователя, однозначно связанного с достижением максимума концентрации диффундирующего растворителя. Недостатками этого метода являются:

1) невысокая точность из-за необходимости определения моментов достижения максимумов на кривых изменения электродвижущей силы (ЭДС) преобразователя, где производная ЭДС по времени близка к нулю, и наблюдается недостаточная чувствительность измеряемого параметра к изменению времени;

2) затраты времени на поиск требуемого значения наносимой при импульсном воздействии дозы растворителя, которая обеспечивает использование диапазона статической характеристики гальванического преобразователя со стабильным сигналом и высокой чувствительностью к изменению концентрации растворителя.

В [5] нами представлен новый метод НК коэффициента диффузии в тонколистовых изделиях из анизотропных пористых материалов, обеспечивающий повышение точности за счет использования более высокой чувствительности измеряемого параметра к изменению времени. Метод основан на использовании линейного импульсного источника дозы диффузанта, фиксирование которого в различных направлениях относительно ориентации расположения волокон позволяет определять коэффициент диффузии с учетом анизотропии свойств материала. Метод также исключает необходимость предварительной градуировки применяемого измерителя концентрации диффузанта, но обладает существенно более высокой гибкостью по сравнению с представленным нами ранее методом [4] за счет возможности выбора значений сигнала преобразователя, при котором фиксируются входящие в расчетное выражение моменты времени.

Ограничения, выполняемые при использовании данного метода, на минимальные размеры плоского участка изделия, толщину материала, длину линии импульсного воздействия, расстояние от источника до электродов гальванического преобразователя и длительность нанесения импульсного воздействия позволили для описания процесса массопереноса использовать краевую задачу массопереноса в неограниченной среде при нанесении импульсного воздействия от плоского источника массы [5]:

$$\frac{\partial U(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D \frac{\partial U(x, \tau)}{\partial x} \right] + \frac{W}{\rho_0} \delta(x, \tau), \quad \tau > 0, \quad 0 \leq x < \infty,$$

$$U(x, 0) = U_0; \quad \frac{\partial U(0, x)}{\partial x} = 0; \quad U(\infty, \tau) = U_0;$$

где $U(x, \tau)$ - концентрация диффузанта в исследуемом изделии на расстоянии x от линейного источника импульса массы в момент времени τ ; D - коэффициент диффузии; $\delta(x, \tau) - \delta$ - функция Дирака; ρ_0 - плотность абсолютно сухого исследуемого материала; W - мощность «мгновенного» источника диффузанта, действовавшего в начале координат $x = 0$, вычисляемая как отношение количества диффузанта (подведенного к контролируемому изделию) к произведению длины линии L импульсного воздействия на толщину h исследуемого листового материала; U_0 - начальная концентрация диффузанта в исследуемом материале в момент времени $\tau = 0$.

Расчетное выражение для определения искомого коэффициента диффузии получено в виде [5]:

$$D = x_0^2 (\tau_2 - \tau_1) / [4\tau_2\tau_1 \ln \sqrt{(\tau_2/\tau_1)}], \quad (1)$$

где τ_1, τ_2 - моменты времени достижения одинаковых значений ЭДС преобразователя соответственно на восходящей и нисходящей ветвях кривых изменения выходной характеристики преобразователя во времени.

Используя традиционные подходы теории погрешностей измерений [6] применительно к выражению (1), получим выражение для определения среднеквадратической оценки δD относительной погрешности определения искомого коэффициента диффузии в виде:

$$\delta D = \sqrt{4(\delta r_0)^2 + [\delta(\tau_2 - \tau_1)]^2 + 0,25[\delta \ln(\tau_2/\tau_1)]^2 + (\delta\tau_2)^2 + (\delta\tau_1)^2 + \delta_m^2}, \quad (2)$$

где $\delta r_0 = \Delta r_0 / r_0$ - относительная погрешность определения координаты расчетного сечения; $\delta\tau_1 = \Delta\tau_1 / \tau_1$ и $\delta\tau_2 = \Delta\tau_2 / \tau_2$ - относительная погрешность определения моментов времени соответственно τ_1 и τ_2 ; $\delta(\tau_2 - \tau_1) = \frac{\Delta(\tau_2 - \tau_1)}{\tau_2 - \tau_1}$ - относительная погрешность измерения разности $(\tau_2 - \tau_1)$; $\delta \ln(\tau_2/\tau_1)$ - относительная погрешность определения $\ln(\tau_2/\tau_1)$; δ_m - суммарное значение

методической погрешности, обусловленной неполным соответствием используемой математической модели реальным физическим процессам, происходящим в измерительном устройстве в ходе эксперимента (в числителе представленных отношений прописаны абсолютные значения соответствующих погрешностей).

Проанализируем входящие в состав соотношения (2) выражения для погрешностей: $\delta(\tau_2 - \tau_1)$ и $\delta \ln(\tau_2/\tau_1)$, используя традиционную методику [6]. После дифференцирования выражения $(\tau_2 - \tau_1)$, замены дифференциалов на знак Δ и знака «-» на «+», получим:

$$\delta(\tau_2 - \tau_1) \approx \frac{\Delta\tau_2 + \Delta\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} \quad (3)$$

Проводя аналогичные преобразования для выражения $\ln(\tau_2/\tau_1)$ получим:

$$\delta \ln(\tau_2/\tau_1) \approx \frac{\tau_1 \Delta\tau_2 + \tau_2 \Delta\tau_1}{\tau_1 \tau_2 \ln(\tau_2/\tau_1)} \quad (4)$$

В результате численного моделирования установлены зависимости погрешностей измерения $\delta\tau_1 = \Delta\tau_1/\tau_1$ и $\delta\tau_2 = \Delta\tau_2/\tau_2$ от погрешности измерения значений ЭДС гальванического преобразователя δE для экспериментальных исследований, представленных в [5]. Эксперименты проводились с использованием **дополнительной информации о статической характеристике преобразователя**, полученной нами ранее. В результате установлено, что при расположении электродов гальванического преобразователя на расстоянии $r_0 = 4$ мм при $\delta E = 0,5$ % погрешность $\delta\tau_1$ принимает значения в диапазоне от 2,24 до 2,52 % (в зависимости от знака отклонения). В расчетах использовалось среднее значение 2,38 %. А погрешность $\delta\tau_2$ менее чувствительна к знаку отклонения и в зависимости от его знака принимает значения при $\delta E = 0,5$ % в диапазоне от 4,54 до 4,64 % (в расчетах использовалось среднее значение 4,59 %).

Рассчитанные по (3), (4) значения относительных погрешностей следующие: $\delta(\tau_2 - \tau_1) \approx 5,84\%$; $\delta \ln(\tau_2/\tau_1) \approx 3,47\%$.

Электроды гальванического преобразователя использовались в виде подпружиненных отрезков стальной проволоки диаметром 0,2 мм с нанесенным гальваническим способом покрытиям цинком и медью [5]. Учитывая особенности измерения локальных значений концентрации полярного растворителя с помощью гальванического преобразователя [3,4] и величину r_0 , относительная погрешность $\delta r_0 = \Delta r_0 / r_0$ была оценена в 2,5 %. Для методической погрешности δ_m была принята оценка сверху в 5% [3,4].

В результате согласно (2) было получено теоретическое значение среднеквадратической оценки относительной погрешности определения искомого коэффициента диффузии представленного метода: $\delta D \approx 10,7$ %. В настоящее время нет возможности оценить систематическую составляющую погрешности в связи с отсутствием эталонных материалов для рассматриваемого класса систем пористый материал – растворитель, поэтому анализировалась случайная составляющая. Среднеквадратическое отклонение результатов измерений, представленные в [5], не превышает теоретически полученной оценки погрешности на основе классической теории метрологии.

Сравнение полученной теоретической оценки погрешности определения коэффициента диффузии представленным методом с аналогичной оценкой для метода, основанного на фиксировании момента достижения максимума концентрации после нанесения импульса [4], в сопоставимых условиях свидетельствует о более высокой точности предлагаемого метода.

Таким образом, по сравнению с методом неразрушающего контроля тонколистовых анизотропных пористых материалов, основанном на фиксировании максимума сигнала преобразователя после точечного импульсного воздействия дозой растворителя [4], предлагаемый метод обладает не только существенно более высокой гибкостью, но и более высокой точностью.

Список литературы

1. **Selivanova Z.M.** Simulation of the thermophysical experiment with remote control to determine the quality properties of the object / Z. M. Selivanova, D. S. Kurenkov, T. A. Hoang // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1553(1), 012026.
2. **Selivanova Z.M.** Intelligent Information-Measuring System for Operational Control of Thermo-Physical Properties of Heat Insulating Materials // Z. M. Selivanova, D.S. Kurenkov, O.V. Trapeznikova, I.V., Nagornova // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1546(1), 012029.
3. **Belyaev V.P.** Selecting Optimal Operating Parameters for Measuring the Solvent Diffusion Coefficient in Non-Destructive Testing of Products Made from Capillary-Porous Materials / V.P. Belyaev, S.V. Mishchenko, P.S. Belyaev // Measurement Techniques.- August 2015, Vol. 58, No. 5, pp. 574-579.
4. **Belyaev V.P.** Determination of the Diffusion Coefficient in Nondestructive Testing of Thin Articles of Anisotropic Porous Materials/ V.P. Belyaev, S.V. Mishchenko, P.S. Belyaev // Measurement Techniques.- July, 2017, Volume 60, No. 4, pp. 392-398.
5. **Belyaev V.P.** Operational Monitoring of the Diffusion Coefficient in Thin Anisotropic Porous Materials/ V.P. Belyaev, S.V. Mishchenko, P.S. Belyaev // Technical Physics Letters, 2018, Vol. 44, No. 12, pp. 1215–1217.
6. **Пономарев С.В.** Теоретические и практические основы теплофизических измерений / С.В. Пономарев, С.В. Мищенко, А.Г. Дивин, В.А. Вертоградский, А.А. Чуриков - Под ред. Пономарева С.В. – М.:ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 408 с.

**Аль-Бусаиди С.С.С.
Al-Busaidi S.S.S.**

ФГБОУ ВО "Тамбовский государственный технический университет",
г. Тамбов

Tambov State Technical University, Tambov

Аль-Бусаиди Саид Султан Саид – соискатель кафедры "Мехатроника и технологические измерения».

Al-Busaidi Said Sultan Said – Degree seeker of the Department "Mechatronics and technological measurements".

**К вопросу о выборе варианта управленческого решения при
внедрении проекта улучшения деятельности испытательной
лаборатории**

**To the question of choosing an option of management solutions when
implementing a project of testing laboratory activities improvement**

Ключевые слова: вероятность реализации проекта, значимость последствий внедрения проекта, индикатор возможности улучшения, экспертный метод, совершенствование работы.

Аннотация: обсуждается применение экспертного метода при подготовке принятия управленческого решения о внедрении проектов совершенствования деятельности в испытательной лаборатории, базирующееся на определении ранга показателя «Индикатор возможности улучшения» ИВУ.

Keywords and phrases: probability of project implementation, significance of consequences of project implementation, indicator of possibility of improvement, expert method, improvement of work.

Abstract: article discusses the use of the expert method in preparing the adoption of a managerial decision on the implementation of projects to improve activities in the testing laboratory, based on the determination of the rank of the indicator "Improvement Opportunity Indicator" IOI.

В докладе рассмотрен следующий подход к выполнению работ по улучшению деятельности испытательной лаборатории (ИЛ):

1) руководитель лаборатории создаёт команду экспертов из специалистов ИЛ и поручает им произвести сравнительную оценку рассматриваемых вариантов проектов улучшения деятельности в ИЛ;

2) команда экспертов для каждого рассматриваемого проекта осуществляет балльную оценку: А) первого показателя «Вероятность реализации проекта» ВР с использованием пятибалльной квалиметрической шкалы: 1 – очень низкая (вероятность реализации проекта совершенствования не более 10 %); 2 – низкая (10 – 35 %); 3 – средняя (35 – 65 %); 4 – высокая (65 – 90 %); 5 – очень высокая (90 – 100 %); Б) второго показателя «Значимость положительных последствий внедрения проекта» ЗП с применением пятибалльной квалиметрической шкалы: 1 – очень маленькая (затраты окупаются более чем за 7 лет); 2 – небольшая (5 – 7 лет); 3 – существенная (3 – 4 года); 4 – большая (1 – 2 года); 5 – очень большая (быстрее, чем за 1 год);

3) ранг (значение, уровень, класс) искомой оценки показателя «Индикатор возможности улучшения» (ИВУ) для каждого рассматриваемого проекта улучшения (по назначенным экспертами балльным оценкам показателей ВР и ЗП) определяют с применением двумерной матрицы, представленной в докладе в виде матрицы-таблицы.

При этом в матрице-таблице находят ячейку, располагающуюся на пересечении строки (соответствующей назначенной командой экспертов величине показателя ВР) и столбца (соответствующего определённой командой экспертов балльной оценке показателя ЗП) и в этой ячейке матрицы-таблицы считывают значение (уровень) ранга полученной оценки показателя ИВУ для рассматриваемого проекта улучшения деятельности в анализируемом процессе испытательной лаборатории. Отметим, что ранг I является самым низким, а ранг VI – самым высоким рангом рассматриваемых проектов улучшения деятельности в ИЛ.

В лаборатории кафедры «Мехатроника и технологические измерения» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» были рассмотрены два проекта внедрения новых алгоритмов обработки экспериментальных данных при измерении теплофизических свойств твёрдых материалов. При этом научным руководителем кафедры было

принято решение о целесообразности внедрении проекта, предусматривающего использование метода линейного импульсного источника теплоты (для которого эксперты определили ранг VI) при измерении коэффициента температуропроводности a , теплопроводности λ и объёмной теплоёмкости $c\rho$, что было обусловлено тем, что при внедрении этого проекта требовались заметно меньшие затраты времени и меньшее по объёму расходование предоставленных заказчиком материалов на изготовление и подготовку исследуемых образцов, что создавало условия для снижения срока окупаемости проекта.

УДК 631.3

Гребенникова Н.М., Дивин А.Г., Сенкевич С.А.
Grebennikova N.M., Divin A.G., Senkevich S.A.

ФГБОУ ВО "Тамбовский государственный технический университет",
г. Тамбов

Tambov State Technical University, Tambov

Гребенникова Наталья Михайловна – к.т.н., доцент кафедры «Мехатроника и технологические измерения»; **Дивин Александр Георгиевич** – д.т.н., доцент, профессор кафедры «Мехатроника и технологические измерения»; **Сенкевич Сергей Алексеевич** – студент спец. 15.03.06 «Мехатроника и робототехника».

Grebennikova Natalia Mikhailovna - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of "Mechatronics and Technological Measurements"; **Divin Alexander Georgievich** - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of "Mechatronics and Technological Measurements"; **Senkevich Sergey Alekseevich** - student spec. 15.03.06 "Mechatronics and robotics".

Оценка качества работы макета роботизированного комплекса для мониторинга и сортировки фруктов

Evaluation of the quality of the layout of a robotic complex for monitoring and sorting fruits

Ключевые слова: оценка качества сортировки, программа испытаний.

Аннотация: Рассмотрены этапы оценки качества проведения сортировки фруктов.

Key words: sorting quality assessment, test program.

Abstract: The stages of assessing the quality of fruit sorting are considered.

Одним из важных этапов при подготовке фруктов для реализации, а также при закладке на хранение, является не допущение попадания плодов имеющих повреждения, а также пораженных болезнями. Для выявления таких объектов чаще всего применяется ручная сортировка. При этом очень высокое влияние на качество такой сортировки оказывает человеческий фактор. Для снижения влияния человеческого фактора при сортировке, в рамках выполнения ФЦП ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса

России на 2014-2020 годы» по теме «Разработка новых интеллектуальных робототехнических технологий мониторинга качества и сортировки фруктов» (Соглашение о предоставлении субсидии от 02.12.2019 г. № 05.604.21.0240), изготовлен макет роботизированного комплекса сортировки и мониторинга качества фруктов [1].

Для оценки качества сортировки и подтверждения соответствия требованиям технического задания разработана методика оценки качества сортировки яблок. Методика предусматривает следующие этапы:

1. Подготовка к выполнению измерений.

1.1 Подготовка роботизированного комплекса для мониторинга качества и сортировки фруктов.

1.2 Подготовка контрольных образцов, среди которых необходимы образцы яблок без поверхностных повреждений, а также образцы яблок, имеющие следующие поверхностные повреждения (загнившие растительные ткани плодов площадью равной или более $0,2 \text{ см}^2$; увядшие плоды; плоды, поврежденные сельхозвредителями, с количеством повреждений более двух, расположенных на противоположных поверхностях плода; плоды с пятнами парши более $0,5 \text{ см}^2$; плоды с джонотановой пятнистостью.

Наличие поверхностных повреждений, увядших плодов, повреждение плодов сельхозвредителями, наличие на плодах пятен парши на контрольных образцах определяется визуально. Оценка площади загнившей растительной ткани проводят измерением участка загнившей ткани, а также площадь пятен парши измеряется штангенциркулем (без повреждения поверхности) не менее чем в 4 разных положениях и рассчитывается по формуле $S=\pi d^2/4$

где d – среднее арифметическое значение диаметра участка загнившей ткани;

$$d = \frac{\sum_{i=1}^N d_i}{N}, \text{ где } d_i \text{ – значение диаметра, полученного при } i\text{-том замере, } N \text{ –}$$

общее количество проведенных замеров.

Каждому контрольному образцу присваивается порядковый номер.

1.3 Измеряют и фиксируют условия окружающей среды в месте установки РК (температура, влажность). Проводят внешний осмотр конвейера (поверхность должна быть сухой и чистой от грязи и прочих, мешающих распознаванию объектов). Определяют скорость движения объекта по конвейерной ленте. При необходимости увеличивают или уменьшают скорость движения конвейера для получения необходимой по ТУ на РК.

1.4 Определяют очередность помещения контрольных образцов на конвейер (методом случайной выборки, 3 повтора).

2. Выполнение измерений.

2.1 Запуск роботизированного комплекса.

2.2 Поместить контрольный образец на конвейер.

2.3 Зарегистрировать сигнал («дефект» или «норма») системы технического зрения (визуально на мониторе ПК). При этом в случае обнаружения на контрольном образце поверхностного дефекта манипулятор должен захватить контрольный образец и убрать его с конвейера.

2.4 Внести полученные результаты в протокол испытания.

2.5 Повторить п. 2.1 – 2.4 для всех контрольных образцов согласно очередности.

3. Обработка результатов испытаний.

3.1. Результатом исследования является число случаев правильного и неправильного определения системой технического зрения наличия поверхностных повреждений на объектах контроля и точность срабатывания манипулятора и удаление (или пропуск) поврежденных объектов.

3.2. Рассчитывается среднее арифметическое значение не соответствующих результатов по всем образцам по формуле: $P = \frac{\sum_{i=1}^k n}{N} \cdot 100$

где k – количество контрольных образцов, n – количество не соответствующих (ошибочных) результатов, N – общее количество проведенных испытаний.

3.3. Результат считается соответствующим требованию ТЗ если обеспечивается возможность определения поверхностных дефектов, с вероятностью ошибки 1 и 2 рода не более 15%.

Ошибка 1-ого рода означает, что яблоко без дефектов, отбраковано как дефектное; ошибка 2-ого рода – означает, что дефектное яблоко не отбраковано (пропущено).

Для проведения испытаний, согласно методике, были отобраны образцы яблок 3-х сортов «Орловское полосатое», «Спартан», «Имрус». Общее количество отобранных образцов составило 156 шт., из них сорта «Орловское полосатое» - 48 шт., «Спартан» – 48 шт., «Имрус» – 60 шт.

Из общего числа отобранных образцов

- без поверхностных повреждений - 36 шт.,

а так же имеющие следующие поверхностные повреждения:

- загнившие растительные ткани плодов площадью от 0,2 см² (в количестве 34 шт.); увядшие плоды (в количестве 15 шт.); плоды, поврежденные сельхозвредителями, с количеством повреждений более двух, расположенных на противоположных поверхностях плода (в количестве 22 шт.); плоды с пятнами парши более 0,5 см² (в количестве 34 шт.); плоды с джонотановой пятнистостью (в количестве 15 шт.).

В результате испытаний получены следующие результаты: для сорта Орловское полосатое, было допущено 17 ошибок из 143 замеров (12 %) (из них ошибок первого рода - 9 (6,3% от общего числа измерений), ошибок второго рода – 8 (5,6% от общего числа измерений)), для сорта «Спартан» было допущено 19 ошибок из 143 замеров (13 %), (из них ошибок первого рода - 11 (7,7% от общего числа измерений), ошибок второго рода – 8 (5,6% от общего числа измерений)), для сорта «Имрус» допущено 25 ошибок из 180 замеров (14 %), (из них ошибок первого рода - 12 (6,7% от общего числа измерений), ошибок второго рода – 13 (7,2% от общего числа измерений)).

Список литературы

1. **Vision** system for detection of defects on apples using hyperspectral imaging coupled with neural network and haar cascade algorithm. Balabanov P.V., Divin A.G., Egorov A.S., Yudaev V.A., Lyubimova D.A. В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. 2020. С. 52058.

Научное электронное издание

ТЕПЛОФИЗИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

**ДВЕНАДЦАТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКАЯ ШКОЛА**

Компьютерное макетирование А. А. Жирковой
Обложка, упаковка, тиражирование И. В. Евсеевой

ISBN 978-5-8265-2452-7



Подписано к использованию 16.03.2022.
Тираж 50 шт. Заказ № 8

Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14.
Телефон (4752) 63-81-08, 63-81-33.
E-mail: izdatelstvo@tstu.ru