



РОССИЙСКИЙ
ФОНД
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ



ОДИННАДЦАТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКАЯ ШКОЛА

ИНФОРМАЦИОННО- СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ В ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

В 2-х томах

Том I

Тамбов

◆ Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ» ◆

2018

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Российская академия наук
Администрация Тамбовской области
Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова
Филиал МГУ им. М. В. Ломоносова в г. Душанбе
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана
Объединенный институт высоких температур РАН
Национальный комитет по теплофизическим свойствам веществ РАН
Российский фонд фундаментальных исследований
Тамбовский государственный технический университет

ИНФОРМАЦИОННО-СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ В ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

**ОДИННАДЦАТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКАЯ ШКОЛА**

Тамбов, 6 – 9 ноября 2018 г.

Сборник научных статей

В 2-х томах

Том I



Тамбов

◆ Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ» ◆

2018

УДК 536.2.08.001.76
ББК 311
И74

*Школа организована и проведена
при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований
(проект РФФИ № 18-08-20121\2018)*

И74 **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. – 400 экз.
ISBN 978-5-8265-1957-8.

В сборник включены статьи по тематике «Информационно-сенсорные системы в теплофизических исследованиях».

Предназначен для научных работников, преподавателей, аспирантов и студентов.

УДК 536.2.08.001.76
ББК 311

*Материалы статей предоставлены в электронном виде и
сохраняют авторскую редакцию.*

ISBN 978-5-8265-1956-1 (общ.) © Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
ISBN 978-5-8265-1957-8 (т. I) «Тамбовский государственный технический
университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»), 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ	9
<i>Magnus Jaeger, Jeger Kern</i> Grid Stabilization by Smart Control	9
<i>Safarov J., Ashurova U., Ahmadov B., Hassel E.</i> Thermophysical Properties of Diesel and Alcohols Fuel Blends	14
<i>Yoshifumi Tanimoto</i> Effects of Magnetic Field in Chemistry, Physics and Biology	20
<i>Vincenzo Bianco</i> Application of Second Law Analysis to Nanofluids Flow	29
<i>Власов В. В.</i> Исследование интегродифференциальных уравнений, возникающих в теории вязкоупругости и теплофизике	31
<i>Гортышов Ю. Ф., Попов И. А., Щелчков А. В., Миронов А. А., Скрыпник А. Н.</i> Моделирование процессов интенсифицированного теплообмена	38
<i>Езерский В. А., Кузнецова Н. В.</i> Теплофизические характеристики кирпичной кладки, содержащей смеси солей <i>Ивлиев А. Д.</i>	43
Теплоемкость конденсированных материалов при высоких температурах. Микроскопические модели	48
<i>Мирзоев С. Х., Сафаров М. М., Гуломов М. М., Холиков М. М., Хакимов Д. Ш., Рафиев С. С., Раджабов А. Р., Нейматов Г. Н.</i> Модель для описания теплопроводности наножидкостей	55
<i>Ников Н. Я., Жекова Т. Л., Данева М. Д.</i> Воздействие энергоэффектов на организм человека	59
<i>Нобель С. М., Тютюнник В. М., Иванков Е. А.</i> Энергосбережение, материалы, топливо и нетрадиционные источники энергии в международных конкурсах технологий, способствующих устойчивому развитию человечества	64
<i>Печенегов Ю. Я.</i> Теплообмен и сопротивление турбулентных потоков газов при переменных физических свойствах	68
<i>Поярков И. В.</i> Двойная диффузия «вчера, сегодня и завтра»	73
<i>Хина Б. Б.</i> Применение термодинамики в СВС: расчет адиабатической температуры горения при синтезе нестехиометрических соединений в системах Ti–B и Ti–C <i>Хина Б. Б., Горанский Г. Г.</i>	80
О применимости модели миедемы к описанию парциальных термодинамических характеристик многокомпонентного аморфного сплава на основе железа	86

Секция. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА	90
<i>Антонюк С. Н., Арутюнов Б. А., Торховский В. Н., Голосман Е. З., Боевская Е. А., Никитин Д. В.</i>	
Изучение влияния теплопроводности на эффективность гетерогенно- каталитического процесса	90
<i>Богатырев А. О., Львова А. А., Никитин И. М.</i>	
Исследование температурных полей в двухслойном полимерно- металлическом изделии	93
<i>Ветров В. В., Воробьев А. А.</i>	
Исследование конвективного теплопереноса в замкнутых вращающихся конструкциях	98
<i>Громов Ю. Ю., Минин Ю. В., Шахов Н. Г.</i>	
Использование метода Ньютона–Канторовича при исследовании теплофизических свойств объектов	104
<i>Дмитриев О. С., Живенкова А. А., Дмитриев А. О.</i>	
Моделирование теплофизических характеристик полимерных композиционных материалов при отверждении	107
<i>Мордасов М. М., Савенков А. П.</i>	
Бесконтактные аэродинамические методы измерений физических свойств жидкостей	111
<i>Ненахов Е. В., Карташов Э. М.</i>	
Новые соотношения для аналитических решений гиперболических моделей переноса	118
<i>Николенко А. В., Ряжских В. И., Ерин О. Л.</i>	
Математическая модель тепломассопереноса в плоском анизотропном пористом канале	124
<i>Резник С. В., Просунцов П. В.</i>	
Теплофизические проблемы ракетно-космических композитных конструкций	127
<i>Ряжских А. В., Качкин И. Н.</i>	
Нагрев нисходящего потока суспензии в цилиндрическом вертикальном канале при граничных условиях второго рода на смоченной поверхности	132
<i>Саидзода К. Б., Сафаров М. М.</i>	
Технология формирования тонких слоистых структур и их получения	135
<i>Сумин В. А., Ряжских В. И.</i>	
Приближенное аналитическое решение задачи свободной конвекции в прямоугольной полости при граничных условиях второго рода	139
<i>Таров Д. В., Али-Шариф А. Д.</i>	
Применение углеродных нанотрубок для получения наножидкостей	143
<i>Фролов С. В., Синдеев С. В.</i>	
Влияние неньютоновских свойств на течение вязкой жидкости в Т-бифуркациях на примере церебральных артерий	146

Секция. НОВЫЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ, МАТЕРИАЛЫ, ТОПЛИВО И НЕТРАДИЦИОННЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ	154
<i>Артыщенко С. В., Семка Б. В., Пастернак Ю. Г., Гусев М. В.</i> Способ передачи энергии в атмосферном оптическом канале с помощью лазерного излучения со спиральным фазовым фронтом	154
<i>Джураев Д. С.</i> Применение магнитных жидкостей на основе трансформаторного масла	157
<i>Дмитриевский Б. С., Башкатова А. В.</i> Моделирование тепловых режимов процесса плавления в дуговых сталеплавильных печах малой вместимости	160
<i>Макагон А. Н., Кузьмина Р. И., Печенегов Ю. Я., Бурухина О. В.</i> Твердотопливная воздухонагревательная печь с каталитическим дожиганием газообразных продуктов неполного горения	164
<i>Печенегов Ю. Я., Грачева Ю. А., Денисов В. А., Черемухина И. В.</i> Энергосбережение при использовании водяного пара в качестве греющего теплоносителя	167
Секция. НОВЫЕ МЕТОДЫ И ИНФОРМАЦИОННО-СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИЗМЕРЕНИЙ	170
<i>Алексеев В. В., Лакомов Д. В.</i> К вопросу обработки изображений объектов систем жизнеобеспечения города для выявления повреждений	170
<i>Анциферова В. И., Струков И. И., Гречаный С. В.</i> Моделирование процессов и выбор решения в информационных системах	173
<i>Анциферова В. И., Струков И. И., Гречаный С. В.</i> Принципы построения СУБД отраслевой информационной системы	176
<i>Бабич А. М., Роганов В. Р., Филиппенко В. О.</i> Возможность использования монокулярной системы технического зрения при определении расстояний между объектами	179
<i>Балабанов П. В., Дивин А. Г., Прилипухов В. В., Шапошникова С. С.</i> Система управления температурным режимом в процессе сортировки клубней картофеля	183
<i>Богачев И. В., Левенец А. В.</i> Алгоритм обратимого сжатия кадров измерительных данных на основе разбиения секущими	186
<i>Воробьев Д. Н., Минин Ю. В., Нурутдинов Г. Н.</i> Идентификация графиков корреляционных и взаимно корреляционных функций для определения характеристик объекта	190

<i>Головин Ю. И., Тюрин А. И., Головин Д. Ю., Самодуров А. А., Дивин А. Г.</i> Новый подход и экспресс-метод определения кинетических теплофизических характеристик материалов	193
<i>Епифанова К. А., Нурзула Есимова, Роганова Э. В., Амури Саер</i> К задаче создания роботизированных комплексов «умная теплица»	196
<i>Завражнов А. И., Лобачевский Я. П., Завражнов А. А., Ланцев В. Ю.</i> Концепция научно-технологического развития цифрового сельского хозяйства	203
<i>Зольников В. К., Крюков В. П., Кулай А. Ю., Струков И. И.,</i> <i>Солодилов М. В., Евдокимова С. А., Скворцова Т. В., Яньков А. И.</i> Условия эксплуатации микросхем космического назначения	211
<i>Зольников В. К., Кулай А. Ю., Крюков В. П., Евдокимова С. А.,</i> <i>Скворцова Т. В., Яньков А. И.</i> Электронная компонентная база космического назначения	215
<i>Зольников В. К., Кулай А. Ю., Савченко А. Л., Струков И. И., Чубур К. А.,</i> <i>Чевычелов Ю. А., Яньков А. И.</i> Методы создания сбоеустойчивых микросхем	219
<i>Зольников В. К., Кулай А. Ю., Струков И. И., Чубур К. А.,</i> <i>Гречаный С. В., Солодилов М. А., Савченко А. Л.</i> Оценка ресурса изделий по ионизационным и структурным эффектам для космического назначения	222
<i>Зольников В. К., Кулай А. Ю., Струков И. И., Чубур К. А.,</i> <i>Чевычелов Ю. А., Гречаный С. В.</i> Создание средств контроля работоспособности в процессе испытаний	226
<i>Зольников В. К., Кулай А. Ю., Струков И. И., Чубур К. А.,</i> <i>Чевычелов Ю. А., Яньков А. И.</i> Конструкция и технология микросхем космического назначения	229
<i>Зольников К. В., Яньков А. И., Крюков В. П., Арзамасцев М. Ю.,</i> <i>Потапов И. П., Скляр В. А., Смерек В. А., Макаренко Ф. В.</i> Исследование стойкости микросхем на воздействие тяжелых заряженных частиц	233
<i>Зольникова А. Н., Крюков В. П., Кулай А. Ю., Чубур К. А.,</i> <i>Струков И. И., Савченко А. Л., Гречаный С. В.</i> Моделирование тока ионизации для микросхем в космической среде	237
<i>Ищук И. Н., Громов Ю. Ю., Парфирьев А. В.</i> Применение численных методов в решении задач теплопроводности при исследовании ИК-сигнатур объектов специального мониторинга	241
<i>Ищук И. Н., Дмитриев Д. Д., Филимонов А. М.</i> Поиск объектов на тепловых томограммах по их гистограммам	248

<i>Ищук И. Н., Тяпкин В. Н., Долгов А. А., Бебенин А. А.</i> Способ классификации техногенных объектов на основе построения многослойных тепловых томограмм	251
<i>Казьмин А. И., Федюнин П. А.</i> Метод измерения диэлектрической и магнитной проницаемостей многослойных радиопоглощающих покрытий	257
<i>Левенец А. В., Чье Ен Ун</i> Аппаратная поддержка блочного алгоритма сжатия измерительных данных	261
<i>Майникова Н. Ф., Рогов И. В., Ярмизина А. Ю., Попов В. Д., Трофимов Д. В.</i> Теоретическое обоснование метода неразрушающего определения толщины полимерных покрытий на металлических основаниях	265
<i>Мищенко С. В., Майникова Н. Ф., Попов О. Н., Завражин Д. О.</i> Неразрушающий теплофизический контроль структурных переходов в полимерных материалах	269
<i>Мордасов М. М., Мордасов М. Д.</i> Измерительная емкость с дистанционным изменением объема	274
<i>Негуляева А. П., Мордасов С. А., Чернышов В. Н.</i> Адаптивный микроволновый метод и реализующая его система неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов и изделий	278
<i>Нурзула Есимова, Мещерякова Е. Н., Асмолова Е. А., Кувшинова О. А.</i> Методы теории обнаружения сигналов применительно к психофизическому шкалированию	282
<i>Роганов В. Р., Михеев М. Ю., Роганова Э. В., Гринцова О. В., Лавендел Ю. О.</i> Задача разработки оптико-программно-аппаратного комплекса «Трехмерный медицинский атлас»	288
<i>Роганов В. Р., Роганова Э. В., Герасименко А. В.</i> К вопросу о расчете показателей надежности систем активного резервирования	293
<i>Родионов Ю. В., Никитин Д. В., Нахман А. Д.</i> Средние рядов Фурье как модель теплофизического процесса	297
<i>Салихов Т. Х., Махмалатиф А.</i> Вклад температурной зависимости оптического коэффициента поглощения на параметры второй гармоники нелинейного фотоакустического сигнала в оптически неоднородных двухслойных системах	301
<i>Селиванова З. М., Куренков Д. С.</i> Моделирование измерительных сигналов интеллектуальной информационно-измерительной системы дистанционного контроля теплофизических свойств твердых материалов	308

<i>Слезин К. А., Нурутдинов Г. Н., Ивановский М. А.</i> Построение ГИС для моделирования лесных пожаров	312
<i>Слезин К. А., Рыжков А. П., Севенюк В. В.</i> Использование нейронечеткой классификации для моделирования динамики контуров лесных пожаров	317
<i>Трефилов П. А., Минин Ю. В., Шахов Н. Г.</i> Использование темпоральной базы данных при проведении теплофизических измерений и экспериментов	321
<i>Чернышов В. Н.</i> Информационно-измерительная система оперативной криминалистической экспертизы наркотических веществ	324
<i>Ярмизина А. Ю., Желтов А. А., Богометова О. Е., Майникова Н. Ф.</i> Определение толщины покрытия из фторопласта на металлическом основании	328

УДК 004.77

GRID STABILIZATION BY SMART CONTROL

Magnus Jaeger, Jegor Kern

Ostbayerische Technische Hochschule (OTH) Amberg-Weiden, Germany

Micro-CHP 2.0, Germany

m.jaeger@oth-aw.de; je.kern@oth-aw.de

Abstract. This paper deals with the survey to the question how Micro Combined Heat and Power stations (CHP) can be operated in the future, so that they have a stabilizing effect on Smart Grids. In this work, a control and regulation software for the plant is developed and tested on a laboratory setup. On the one hand, this concept includes different operation modes of the system (energy supply, feed into the grid and self-consumption), which are based on a dynamic economy calculation. On the other hand, an automatic drop control provides power output as a function of the grid frequency for regulating the system. Finally, this software contains functionalities for connecting the system to the electricity markets and trading of free energy capacities.

Keywords: Micro-CHP, Smart Grid, Grid Stabilization, Digitalization, Automation

I. Introduction

A fundamental change in the energy supply system in Germany is taking place, which starts with the decision on the Energy Transition (Energiewende). The climate goals in Germany are planning 80% of electricity generation will be covered by renew-able energy sources (RES) by the year 2050. Furthermore, greenhouse gas emissions are to be reduced by at least 80 percent until the middle of this century [1]. Due to the strong expansion of RES such as sun and wind, RES already provides around 31.5% of electricity generation in Germany in the year 2016 [2]. According to estimates by BDEW (Federal Association of the Energy and Water Industries e.V.), ZVEI (German Association of the Electrical- and Electronic Industries e.V.) and the Federal Network Agency, the electricity grids in Germany are facing new challenges due to the increasing fluctuating supply of electricity from renewable sources [3 – 5]. As a result, the integration of RES with a high level of supply reliability will only

succeed if the existing energy system will be upgraded with intelligent and efficient technologies. In order to be able to operate Micro-CHP plants in this kind of electricity grid economically and conducive to the grid, in future the energy consumers and producers have to evaluate the grid and market signals and to adjust their operation mode according to the actual situation.

II. Objectives

The main objective of this research work described in this paper is to develop and test a Smart Grid compatible control and regulation software for a Micro-CHP. On the assumption of economic energy supply of the plant, this software is intended for regulating the grid frequency by the Micro-CHP in the power range of 5 to 10 kilowatts. In addition, the connection of this system to electricity markets is to be provided.

III. Methodology

This work explains the structure of the power grid as well as the measures of the grid operators for grid stabilization. In addition to redispatch measures and load management, this paper describes, the mechanisms of control power. In addition, this paper examines the processes of the spot energy market to implement the principles of energy trading in the controlling software. After capturing this basis, the corresponding control and regulation software was designed and tested using two measurement experiments. Subsequently, software and functional tests were carried out to ensure the functionality of this system as well as two measuring tests to determine the quality of power control.

The drop control measurement tests were based on the prequalification verification procedure for the provision of positive primary control power. Based on this method, the micro-CHP is starting up and shutting down in accordance with a predetermined grid frequency [6] (see Table. 1). In this experiment, it was necessary to investigate whether the test plant manages to increase or reduce the maximum power of 6.8 kWel with in a predetermined period of 30 seconds.

To investigate the energy supply, the amount of energy to be supplied was specified manually for four 15-minute blocks. In this experiment two related blocks and the third with an intermediate “empty” block were examined. The volume of energy traded within the 15-minute blocks was defined as 1.5 kWh from the nominal power (6 kW), 1.7 kWh from the maximum power (6.8 kW) and finally 1.6 kWh for the average power of 6.4 kW. (see Table 2). The main investigative criteria were the timely activation of the system based on occurrence of an order for energy supply and the amount of energy delivered itself.

Table 1. Specification of the grid frequency for the measurement test

Starting Time	Ending Time	Netzfrequenz [Hz]
04:45 pm	05:00 pm	50,0
05:00 pm	05:15 pm	49,8
05:15 pm	05:30 pm	50,0
05:30 pm	05:45 pm	49,8
05:45 pm	06:00 pm	50,0

Table 2. Schedule of the micro-CHP for the measurement test

Starting Time	Ending Time	Set Point [kWh]
09:45 pm	10:00 pm	1,5
10:00 pm	10:15 pm	1,6
10:15 pm	10:30 pm	0,0
10:30 pm	10:45 pm	1,7

IV. Results

In summary, the flexibility of the pilot plant was achieved by means of three software layers. On the one hand, the basic mode of operation of the plant is aligned based on economic considerations. Specifically, it states that the software calculates the electricity cost of the installation and compares it with the total revenue from (possible) compensation and market price for electricity. Based on this calculation, a distinction is made for the operation mode of the plant between electricity supply, own consumption or feed / sale of the CHP electricity.

On the other hand, the micro CHP is able to automatically regulate the grid frequency (FRQ) based on the frequency measurement and the drop control. The required maximum startup time of 30 seconds was clearly achieved with the startup time of the system of 24 seconds. Furthermore, a

very high quality of the frequency control is achieved. After a short overshoot of the power controller by starting process, the system supply a constant power (PEL) with a mean deviation from the set point of 0.5 thousandth. After switching the test to the nominal frequency, the sequence for switching off was triggered after 5 seconds. After a total of 8 seconds, the micro CHP was completely deactivated (see Fig. 1).

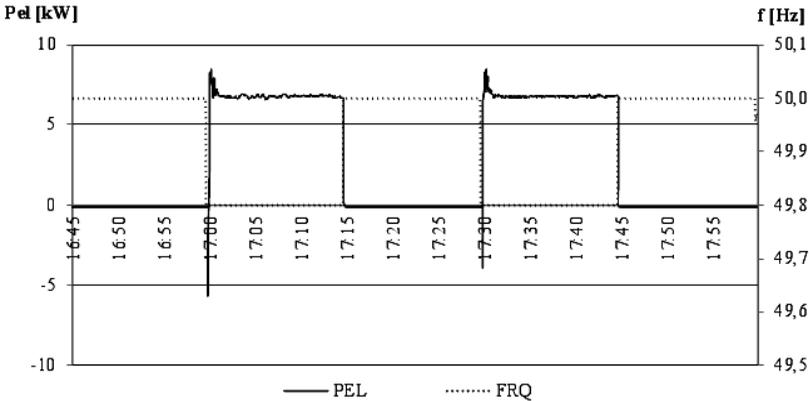


Fig. 1. Measuring test Droop Control [7]

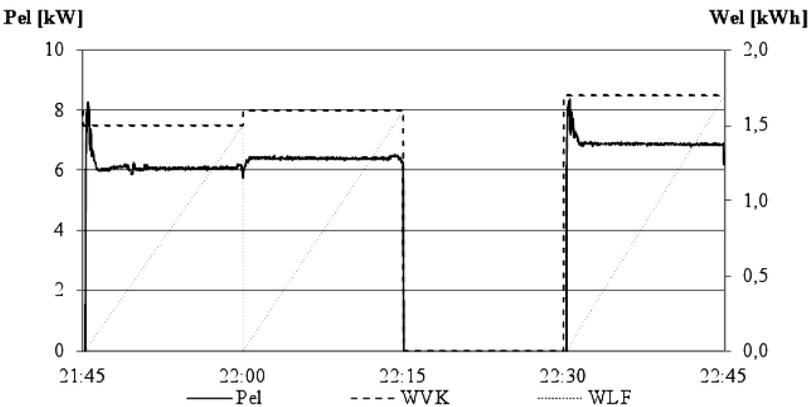


Fig. 2. Measuring test Energy Trading [7]

In the energy trading measurement experiment, the system was activated within a total time of 18 seconds in the presence of an order. It can be appreciated that the micro-CHP unit has operated the two contiguous 15 minutes blocks without intermediate shutdown. Furthermore, it can be seen that after a blank block, the system was turned on again for a period of 15 minutes as expected (see Fig. 2).

If the “sold” (WVK) and the supplied energy quantities (WLF) for the first and second block are compared, then a relative deviation of less than 1 thousandth can be determined. The deviation increases to 5 thousandth in the last block: The reason for this is that the converted target power was at its maximum of 6.8 kW, and that, due to the limitation of the power controller, the program no longer had the opportunity to compensate for the power fluctuations.

References

1. Bundesregierung, “Energiewende,” [Online]. Available: https://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Energiewende/Fragen-Antworten/1_Allgemeines/1_warum/_node.html. [Accessed 20 Februar 2018].
2. BMWi, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Erneuerbare Energien in Zahlen, Berlin: Druck- und Verlagshaus Zarbock GmbH & Co. KG, Frankfurt, 2017. – P. 8.
3. B. f. E.- u. W. BDEW and Z. E.- u. E. ZVEI, Eds., Smart Grids in Deutschland. – Berlin, 2012.
4. DENA, Deutsche Energie-Agentur GmbH, “DENA-Verteilnetzstudie”. – Berlin, 2012.
5. Bundesnetzagentur, “Smart Grid und Smart Market, Eckpunktpapier”, 2011.
6. ÜNB, deutsche Übertragungsnetzbetreiber, Präqualifikation für die Vorhaltung und Erbringung von Regelleistung, [Online]. Available: <https://www.regelleistung.net/ext/static/prequalification>. [Accessed 06 März 2018].
7. OTH Amberg-Weiden, “Eigene Darstellung”, Weiden, 2017.

THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF DIESEL AND ALCOHOLS FUEL BLENDS

Д. Сафаров¹, У. Ашурова², Б. Ахмедов³, Э. Хассель¹

¹*Университет Росток, Германия*

²*Мингечаурский государственный университет,
Мингечаур, Азербайджан*

³*Технический университет, Баку, Азербайджан*

J. Safarov¹, U. Ashurova², B. Ahmadov³, E. Hassel⁴

¹*University of Rostock, Germany*

²*Mingechevir State University, Mingechevir, Azerbaijan*

³*Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan*

Abstract. Alcohols have been proposed as an alternative to conventional fossil gasoline or diesel fuels in internal combustion engines and usage of alcohols as fuels strongly increased during the last years. This work presents thermophysical properties, (p , ρ , T) data, of binary mixtures, aka fuel blends, of (ethanol and diesel) and of (1-butanol and diesel) at $T = (263.15 \text{ to } 468.15) \text{ K}$ and up to $p = 200 \text{ MPa}$. An equation of state (EOS) for the numerical fitted (p , ρ , T) data of the investigated mixtures has been developed as a function of pressure, temperature and concentration.

1. Introduction. Internal combustion engines driven with Diesel fuel are attractive in comparison to gasoline driven engines, because of relative low CO_2 emissions, high power and reliable functionality.

The stringent emission standards require advanced Diesel engines technology with improvement of the primary injection and combustion processes within the engine combustion chamber [1]. One important development successfully applied to meet the stringent legal requirements for emissions of Diesel engine is the use of a common rail for fuel injection into the primary combustion chamber. Another current development is the use of alternative fuels instead of fossil diesel or mixtures of alternative fuels and fossil diesel, so-called blends.

Alternatives to fossil fuels for the Diesel engine, which mostly means fuels from regenerative sources, are e.g. rapeseed oil, bio-alcohols, fuel mixtures or even synthetic fuels, biodiesel, liquid petroleum gas, compressed natural gas, etc. [2]. Alcohols have been used as alternative fuels or in blends in internal combustion engines for a long time and they tends to decrease internal combustion engine emissions [3].

Alcohol fuels often produce higher evaporative emissions than diesel fuels due to higher vapor pressures and the relative low energy density of

alcohol fuels, low heating value, cause a drop in engine performance if the engine management system does no compensation [4]. Alcohol fuels have a higher octane number than traditional fossil fuels and can be used as an octane booster for fuels. Nevertheless, alcohols have a lower cetane number, which limits the usage of neat alcohols in Diesel engine as an alternative fuel. Use of cetane enhancers can improve potential of alcohol fuel blends as a promising fuel for Diesel engine [1]. With increase of the amount of alcohol in diesel fuel mixture, there is an increase in both the ignition delay and the rate of initial heat release, premixed combustion, while there is a decrease in diffusion combustion, total combustion duration and combustion temperature [5]. Increase of alcohol percentage in diesel mixtures also improves volatility and viscosity at low temperatures of blend [6]. Ethanol is a good spark-ignition engine fuel [7] and has high octane number when compared to other fuels like methanol, gasoline, natural gas and diesel [8]. 1-butanol possesses less hydrophilic tendency, higher heating value, higher cetane number, lower vapor pressure, higher viscosity and lubricity than ethanol and has a very good miscibility [9].

There are two possibilities to use the alcohols as blend in a Diesel engine. The first way: diesel could be injected in the normal way with injection nozzle into the combustion chamber and additionally with a carburetor alcohol from a separate tank is added to the air flow. In a second way alcohol-diesel-mixture could be injected by the injection nozzle. To ensure an optimal vaporization of the fuel mixture common rail injection systems are preferred [10]. High pressure injection nozzles to the engine cylinder are used provide complete combustion and thereby reduction of soot emissions and noise levels and thus meet necessary legislative requirements [11].

The most important injection parameters, which depend on the physical properties of the fuel, such as distillation range, cloud point, pour point, sulfur content, fuel stability, etc, are the inlet fuel pressure to the injector and the rate of injection which determine the spray penetration and atomization and finally the vaporization. [12].

Upon injection of the fuel in a cylinder, large depressurization of the fuel results in a significant change of the thermophysical properties of the fluid [1]. For optimal design of diesel engine combustion and high pressure fuel injection process with fuel mixtures concerning understanding, modeling and optimizing spray formation, vaporization and combustion and pollutant formation an accurate knowledge of basic fuel thermophysical properties is required [13].

In this paper we present measurement results for basic thermophysical properties of alcohol-diesel-mixtures at high pressures and temperatures and thorough analysis of already existing literature data. From our data we also

derived an empirical equation of state (EOS) as a function of pressure, temperature and composition.

Experiments. The ultra pure ethanol ($w = 99.995\%$), 1-butanol ($w = 99.995\%$) were purchased from Merck Schuchardt OHG, Germany and were thoroughly degassed in glass flasks with special vacuum leak-proof valves before measurements. The Shell Global Solution DK5037 Diesel B0 sample taken in 2015 was used during the preparation of 1-butanol and Diesel B0 binary fuel blends, taken in 2016 during the preparation of ethanol and Diesel B0 binary fuel blends, respectively.

Because, ethanol is not completely miscible with Diesel fuel, firstly we have investigated the stability temperature of these blends in each concentration.

The (p, ρ, T) measurements of alcohol and Diesel fuel blends are carried out using a new modernized high pressure – high temperature Anton Paar DMA HPM vibration tube densimeter [14 – 16].

The density values $\rho(p_{0 \text{ or } s}, T)/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ of alcohol and Diesel fuel blends at ambient or saturated pressures and in all range of experimental temperatures were investigated using the Anton Paar DMA 5000M, DSA 5000M and DMA HPM vibration tube densimeters with an uncertainty of $\Delta\rho = \pm(5\cdot 10^{-3} \text{ to } 3\cdot 10^{-1}) \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. These values are necessary to check the accuracy of the investigated high pressure – high temperature (p, ρ, T) data using the small extrapolation of them to $p = 0.101 \text{ MPa}$ and also to define the saturated density $\rho(p_s, T)$.

Vapor pressure values P/Pa of alcohol and Diesel fuel blends were measured using the two high-accuracy static experimental set ups [17]. The glass cells are used for vapor pressures lower than ambient pressure and at $T = (274.15 \text{ to } 323.15) \text{ K}$. The experiments to determine the vapor pressure of alcohol and Diesel fuel blends at $T = (323.15 \text{ to } 468.65) \text{ K}$ and for vapor pressures higher than ambient pressure are performed in a metal cell by using the static method [17].

The dynamic viscosity $\eta(p_0, T)/\text{Pa}\cdot\text{s}$ of alcohol and Diesel fuel blends at $p = 0.101 \text{ MPa}$ and temperatures at $T = (278.15 \text{ to } 468.15) \text{ K}$ are measured using an Anton Paar SVM 3000 Stabinger Viscometer and Anton Paar Rheometer MCR 302.

The constant pressure specific heat capacity of alcohol and Diesel fuel blends $c_p(p_0, T)/\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ at $p = 0.101 \text{ MPa}$ is measured at $T = (253.15 \text{ to } 468.55) \text{ K}$ using the differential scanning calorimeter Pyris 1 [18].

The speed of sound values $u(p_0, T)/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ of alcohol and Diesel fuel blends at $p = 0.101 \text{ MPa}$ and $T = (278.15 \text{ to } 468.15) \text{ K}$ were investigated using the Anton Paar DSA 5000 M vibration tube densimeter and sound velocity meter.

Results. The obtained experimental results were analysed and fitted to various empiric equations.

Density of alcohol and Diesel fuel blends at ambient or saturated pressures $\rho(p_{0\text{ or }s}, T)$ and temperatures at $T = (263.15 \text{ to } 468.55) \text{ K}$ were fitted to the polynomial equations:

$$\rho(p_{0\text{ or }s}, T, x) = \sum_{i=0}^n (x/\text{mole fr.})^i \sum_{j=0}^n l_{ij} (T/\text{K})^j, \quad (1)$$

where $n = 4$ for ethanol and Diesel fuel blends; $n = 3$ for 1-butanol and Diesel fuel blends; l_{ij} are the coefficients of Eqn. (1).

The obtained (p, ρ, T) results as a function of pressure, temperature and mole fraction of alcohol are fitted to the equation of state (1) from Ref. [19]:

$$p(\rho, T)/\text{MPa} = A(T, x)(\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})^2 + B(T, x)(\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})^8 + C(T, x)(\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})^{12}, \quad (2)$$

where the coefficients A , B and C of Eqn. (1) are functions of temperature and mole fraction of alcohol as following form:

$$A = \sum_{i=1}^4 T^i \sum_{j=0}^3 a_{ij} x^j, \quad B = \sum_{i=0}^3 T^i \sum_{j=0}^3 b_{ij} x^j, \quad C = \sum_{i=0}^3 T^i \sum_{j=0}^3 c_{ij} x^j. \quad (3)$$

The vapor pressure values of alcohol and Diesel fuel blends, specific heat capacity $c_p(p_{0\text{ or }s}, T)$ at ambient or saturated pressures, viscosity $\eta(p_0, T)$ and speed of sound values of alcohol and Diesel fuel blends $u(p_0, T)$ at ambient pressure were fitted to the various polynomial equations dependence from temperature and mole fraction of alcohols.

The values of isothermal compressibility $\kappa_T(p, T)$, isobaric thermal expansibility $\alpha_p(p, T)$, difference in isobaric and isochoric heat capacities $(c_p - c_v)(p, T)$, thermal pressure coefficient $\gamma(p, T)$, internal pressure $p_{\text{int}}(p, T)$, isobaric heat capacity $c_p(p, T)$, isochoric heat capacity $c_v(p, T)$, speed of sound $u(p, T)$ and isentropic exponent $\kappa_s(p, T)$ of aliphatic alcohols were calculated from the Eqns. (2–3) using the fundamental equations of thermodynamics [14, 16].

Excess properties of fuel blends. The excess molar volumes $V_m^E / \text{cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ of alcohols and Diesel fuel blends were calculated from experimental (p, ρ, T) values of solutions using Eqn. (4):

$$V_m^E = \{xM_a + (1-x)M_D\} / \rho - xM_a / \rho_a - (1-x)M_D / \rho_D, \quad (4)$$

where: V_m^E is the excess molar volume of blends, x is mole fraction of pure alcohol, M_a and M_D are the molar masses, ρ_a and ρ_D are the densities of pure alcohol and Diesel fuel B0, respectively.

Conclusion. The application of ethanol and 1-butanol alcohols as additive to Diesel fuel as blends were discussed. Firstly, the stability of ethanol and Diesel fuel blends was investigated. The density at ambient and high pressures, also viscosity, heat capacity, speed of sound at ambient pressures, vapor pressure of ethanol or 1-butanol blends of two different Diesel samples with were experimentally investigated.

The various thermophysical properties of these fuel blends were calculated using the experimental values.

References

1. Experimental and numerical analysis of sprayatomization characteristics of biodiesel fuel in various fuel and ambient temperatures conditions / S. H. Park, H. J. Kim, H. K. Suh, C. S. Lee. – Int. J. Heat Fluid Flow 30 (2009). – P. 960 – 970.
2. Doğan, O. The influence of n-butanol/diesel fuel blends utilization on a small diesel engine performance and emissions / O. Doğan. – Fuel 90 (2011). – P. 2467 – 2472.
3. Lapuerta, M. Emissions from a diesel–bioethanol blend in an automotive diesel engine / M. Lapuerta, O. Armas, J. M. Herreros. – Fuel 87 (2008). – P. 25 – 31.
4. Furey, R. L. Volatility characteristics of gasoline/alcohol and gasoline/ether fuel blends / R. L. Furey. – SAE 1985, SAE paper no.: 852116.
5. Effect of injection timing to performance of a diesel engine fuelled with different diesel–ethanol mixtures / A. Murcak, C. Haşımoğlu, İ. Çevik, H. Man. – Fuel, 2015. – 153. – P. 569 – 577.
6. Barabas, I. Liquid densities and excess molar volumes of ethanol + biodiesel binary system between the temperatures 273.15 K and 333.15 K / I. Barabas // Journal of Molecular Liquids. – 2015. – 204. – P. 95 – 99.
7. Effects of butanol–diesel fuel blends on the performance and emissions of a high-speed DI diesel engine / D. C. Rakopoulos, C. D. Rakopoulos, E. G. Giakoumis, A. M. Dimaratos, D. C. Kyritsis // Energy Conversion and Management. – 2010. – 51. – P. 1989 – 1997.
8. Parthasarathi, R. Effects of ethanol-diesel emulsions on the performance, combustion and emission characteristics of di diesel engine / R. Parthasarathi, S. Gowri, C. G. Saravanan // American Journal of Applied Sciences. – 2014. – 11. – P. 592 – 600.
9. Rakopoulos, D. C. Impact of properties of vegetable oil, bio-diesel, ethanol and n-butanol on the combustion and emissions of turbocharged HDDI diesel engine operating under steady and transient conditions / D. C. Rakopoulos, C. D. Rakopoulos, E. G. Giakoumis. – Fuel. – 2015. – 156. – P. 1 – 19.

10. Heavy duty diesel engine with common rail type fuel injection systems Japanese Society of Automotive Engineers IPC-8 Proceedings / Y. Yamaki, K. Mori, S. Kohketsu, K. Mori, T. Kato. – Tokyo, Japan, 1995. – P. 73 – 78.
11. Vant, S. C. Density and Viscosity Measurement of Diesel Fuel Compositions at High Pressure / S. C. Vant, N. F. Glen, C. J. Schaschke // Congress manuscripts: incorporating the 5th European Congress of Chemical Engineering. – 2005. – 82833/1-82833/9.
12. Henein, N. A. Effects of physical properties of fuels on Diesel injection, Transactions of the ASME / N. A. Henein, B. Jawad, E. Gulari // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 1990. – 112. – 308 – 316.
13. High Pressure Density and Speed of Sound in Two Biodiesel Fuels / M. Habrioux, S. V. D. Freitas, J. A. P. Coutinho, J. L. Daridon // J. Chem. Eng. Data 58 (2013). – P. 3392 – 3398.
14. Thermodynamic properties of standard seawater: extensions to high temperatures and pressures / J. Safarov, F. J. Millero, R. Feistel, A. Heintz, E. Hassel // Ocean Science. – 5 (2009). – P. 235 – 246.
15. Thermodynamic Properties of the Geothermal Resources (Khachmaz and Sabir-oba) of Azerbaijan / N. Nabiyev, M. Bashirov, J. Safarov, A. Shahverdiyev, E. J. Hassel // Chem. Eng. Data 54 (2009). – P. 1799 – 1806.
16. Thermophysical properties of 1-butanol over a wide range of temperatures and pressures up to 200 MPa / J. Safarov, B. Ahmadov, S. Mirzayev, A. Shahverdiyev, E. Hassel // Journal of Molecular Liquids. – 209 (2015). – P. 465 – 479.
17. Vapor pressures and activity coefficients of methanol in binary mixtures with 1-Hexyl-3-methylimidazolium bis(trifluoromethylsulfonyl)imide / J. Safarov, I. Kul, M. A. Talibov, A. Shahverdiyev, E. Hassel // J. Chem. Eng. Data 60 (2015). – P. 1648 – 1663.
18. Schick, C. Differential scanning calorimetry (DSC) of semicrystalline polymers / C. Schick // Anal Bioanal Chemistry. – 395 (2009). – P. 1589 – 1611.
19. Safarov, J. T. The investigation of the (p, ρ, T) and (p_s, ρ_s, T_s) properties of $\{(1 - x)\text{CH}_3\text{OH} + x\text{LiBr}\}$ for the application in absorption refrigeration machines and heat pumps / J. T. Safarov // J. Chem. Thermodyn. – 35 (2003). – P. 1929 – 1937.

EFFECTS OF MAGNETIC FIELD IN CHEMISTRY, PHYSICS AND BIOLOGY

Yoshifumi Tanimoto

*Institute for Interdisciplinary Science,
Graduate School of Science and Amphibian Research Center,
Hiroshima University, Higashi-Hiroshima 739-8526, Japan
yt1112@hiroshima-u.ac.jp*

1. Introduction.

Magnetism is one of the most common physical properties of materials. This is because the spin and orbital motions of electrons in an atom produce magnetism. So, it is our dream to control various chemical, physical and biological processes simply using a magnetic field.

The effects of static magnetic fields in chemical and physical processes are divisible into two groups, as shown in Table 1. The first, quantum mechanical effects, arise from the interaction of electron spins in short-lived reaction intermediates called radical pairs. In photochemical reactions of organic molecules, radical pairs are often generated as intermediates. Product yields and radical pair lifetimes are affected by a static magnetic field (MF). The second, mechanical effects, consist of four mechanisms. In electrochemical reactions, the transport of reactants in bulk solution to electrodes is a key process. The motion of ions and electrons in the solution is affected by Lorentz forces. Crystals are often oriented in one direction when crystallization occurs in an MF (magnetic orientation). This orien-

Table 1. Classification of magnetic field effects

Type of effect	Type of MF	Mechanism	Example
Quantum mechanical effect	Homogeneous	Radical pair mechanism	Ref. 1
Mechanical effect	Homogeneous	Lorentz force	Refs. 2 – 5
Mechanical effect	Homogeneous	Anisotropic magnetic energy	Ref. 6
Mechanical effect	Homogeneous	Magnetic susceptibility force	Ref. 7
Mechanical effect	Inhomogeneous	Magnetic force	Refs. 8 – 10

tation happens when a crystal is magnetically anisotropic. Magnetic susceptibility force, which is proportional to the product of the magnetic susceptibility gradient of solutes in solution and the square of magnetic flux density, is operative in crystal growth from solution. The magnetic force is well-known to be proportional to the product of magnetic flux density and its gradient. One application is magnetic levitation of diamagnetic materials. Examples of these effects will be presented in this talk.

2. Quantum Mechanical Effect – Radical Pair Mechanism

Photosensitized Oxidation of 1,3-Diphenylisobenzofuran (DPBF) in SDS Micellar Solution [1]. Fig. 1 portrays UV spectral changes of an aerated SDS micellar solution of AQ and DPBF. Upon photo-irradiation of AQ, DPBF is oxidized to dibenzoylbenzene (DBB). In a zero field, intensities of the absorption bands of AQ (320 nm) and DPBF (410 nm) decrease gradually with irradiation time. In a 0.1 T field, the DPBF degradation is enhanced significantly. The magnetic field effect (MFE) on the degradation yields of AQ and DPBF and the formation yield of DBB are presented in Fig. 2. The degradation yield of AQ was reduced by 10% at 0.2 T, whereas the degradation yield of DPBF decreases and the formation yield of DBB increased by 50...60% at 0.2 T.

In a deaerated solution, the excited triplet AQ, $^3\text{AQ}^*$, is generated by photo-irradiation. It undergoes hydrogen abstraction from dodecyl sulfate (HS), generating a triplet radical pair, $^3(\text{AQH}\cdot \cdot \text{S})$, comprising an anthraquinone radical (AQH \cdot) and a dodecyl sulfate radical ($\cdot\text{S}$). At a zero field, the triplet pair undergoes spin transitions to singlet radical pair $^1(\text{AQH}\cdot \cdot \text{S})$ as well as dissociation of the pair, yielding escape radicals, AQH \cdot and $\cdot\text{S}$. By application of a magnetic field, the yields of escape radicals increase because of the suppression of $T \rightarrow S$ spin transitions.

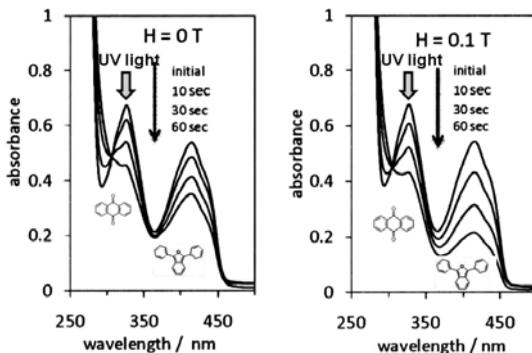


Fig. 1. UV Spectral change of aerated SDS solution of AQ and DPBF at H = 0 T and 0.1 T

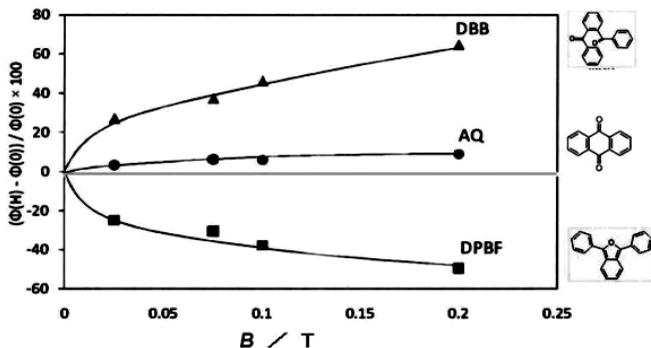


Fig. 2. MFE on the yield of DPBF, AQ and DBB

Degradation of DPBF occurs only in aerated solution containing AQ. Based on these findings we propose the following reaction mechanism.



The degradation yield of DPBF and therefore the formation yield of DBB increases as the yield of oxidation initiator AQH· and ·S increases by application of MF (Fig. 2).

3. Mechanical Effect – Lorentz Force

When a particle with an electric charge e moves at a velocity \mathbf{v} in a magnetic field \mathbf{B} , it receives Lorentz force \mathbf{F}_L ,

$$\mathbf{F}_L = (1/\mu_0) e\mathbf{v} \times \mathbf{B}, \quad (3)$$

where μ_0 is the magnetic permeability of vacuum (Fig. 3). In electrochemical reaction solutes in bulk solution must move to electrodes as the reaction takes place at electrodes. Therefore, many examples of MFE based on Lorentz force have been reported.

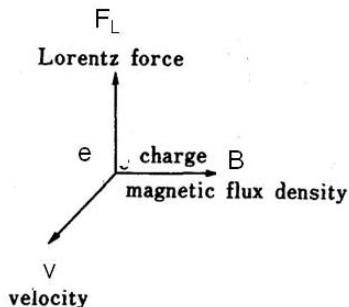
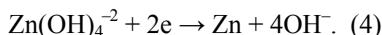


Fig. 3. Lorentz force

Cathodic Potential Oscillation of Zinc Electrode [2]. Cathodic potential oscillation of zinc electrode in alkaline solution was examined. In this reaction zinc metal is deposited at a cathode



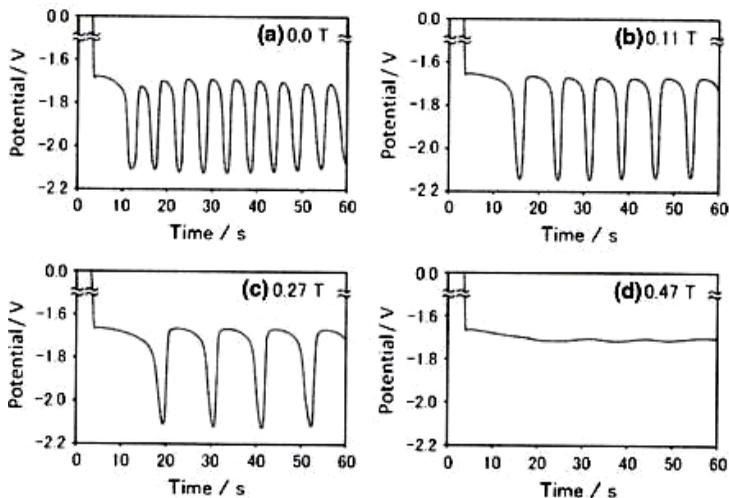


Fig. 4. MFE on the cathodic potential oscillation

By applying a magnetic field, the interval of oscillation increases and the oscillation is quenched at 0.47 T (Fig. 4). In situ observation of the cathode during electrolysis revealed that the oscillation occurs due to the hydrogen gas generation and the solution convection induced by the Lorentz force is the cause of the observed magnetic field effect.

Lead Metal Deposition from Aqueous Solution [3].

When a lead (II) acetate aqueous solution is poured on a zinc metal plate in a Petri dish (50 mm in diameter), metallic lead deposits from the solution because of their ionization tendency.

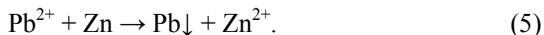
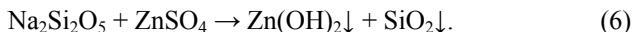


Fig. 5 portrays the MFE on the relative yield of lead metal deposit. This solution is composed of only diamagnetic ions and therefore MFE is explainable by the Lorentz force. MFE depends on the solute concentration. This is explainable by the change in the rate controlling step which depends on the solute concentration.

Silicate Garden (Chemical Garden) Reaction [4, 5]. The silicate garden reaction is a famous reaction that is used popularly for chemical demonstrations. The reaction is simple. When metal salt crystals are put into an aqueous solution of sodium silicate, semi-permeable tubes grow upward in the solution within an hour or so.



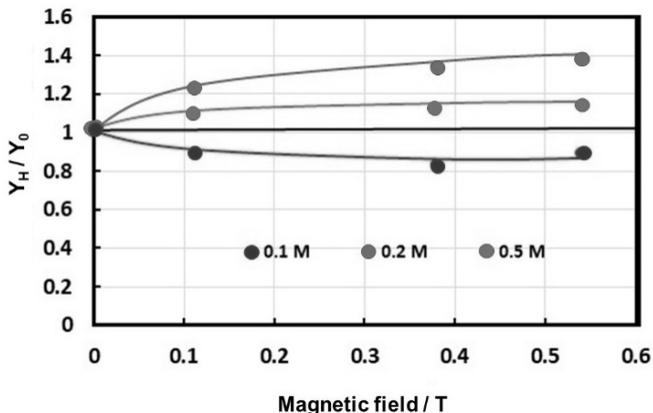


Fig. 5. MFE on the yield of Pb. Y_0 and Y_H are the yield of Pb at 0 T and H T, respectively

Fig. 6 depicts the influence of strong vertical magnetic fields on the tube morphology when zinc sulfate crystals are used. At a zero field, membrane tubes grow upward.

In the presence of a 6 T field, it grows helically in a right-handed direction. When the field direction is reversed, the tube grows helically with a left-handed direction. The chirality of the tube is controlled magnetically.

A concentrated solution of metal salt flows out from the top of the tube. The motion of ions in the solution is affected by the Lorentz force. The direction of the helix is determined by the relative relation between the tube and the vessel wall.

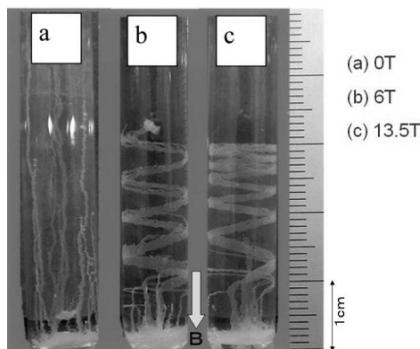


Fig. 6. MFE on the silicate garden reaction

4. Mechanical Effect – Anisotropic Magnetic Energy – Magnetic Orientation –

Magnetic energy, E , of a molecule is given as follows.

$$E = (1/2\mu_0) \chi B^2. \quad (7)$$

Therein, χ is the magnetic susceptibility of the molecule.

When a crystal has magnetically anisotropic, its energy depends on the direction of the crystal,

$$\begin{aligned} E(\theta, B) &= -(nB^2/2)(\chi_{\parallel} \cos^2\theta + \chi_{\perp} \sin^2\theta) = \\ &= -(nB^2/2)[\chi_{\perp} + (\chi_{\parallel} - \chi_{\perp})\cos^2\theta], \end{aligned} \quad (8)$$

where χ_{\parallel} and χ_{\perp} are magnetic susceptibilities of a crystal, n is the mole of molecule composing a crystal, θ is the angle between magnetic field and Z axis of the crystal (See, Fig. 7). Therefore, the crystal undergoes magnetic orientation to the most stable direction, when $E(\theta, B)$ becomes larger than the thermal energy kT .

Magnetic Orientation of Carbon Nanotubes [6]. Carbon nanotubes were prepared from their solution suspension using solvent evaporation. At a zero field, carbon nanotubes are oriented randomly. In an 8 T field, they are oriented in parallel to the field. The magnetic orientation of carbon nanotubes is achieved even though they are as short as a few micrometers in length.

5. Mechanical Effect – Magnetic Force and Magnetic Susceptibility Force

Two forces are derived from magnetic energy (eq. 7) when two parameters χ and B are distance (z)-dependent.

$$F = -\partial E/\partial z = (1/\mu_0)\chi B \partial B/\partial z + (1/2\mu_0)(\partial\chi/\partial z)B^2. \quad (9)$$

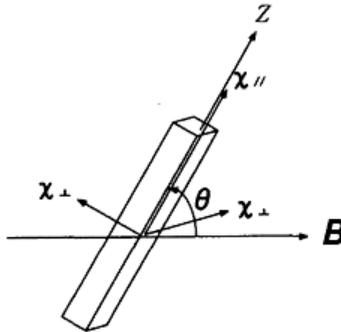


Fig. 7. Magnetically anisotropic crystal

The first term of the right-hand equation is designated as the magnetic force (F_{mag}). The second term is tentatively called the magnetic susceptibility force (F_{sus}).

$$F_{\text{mag}} = (1/\mu_0)\chi B \partial B / \partial z, \quad (10)$$

$$F_{\text{sus}} = (1/2\mu_0) (\partial \chi / \partial z) B^2 \quad (11)$$

F_{mag} is operative only in a gradient magnetic field, whereas F_{sus} is operative when χ is inhomogeneous.

a. Magnetic Susceptibility Force

Glycine Crystal [7]. The effect of a horizontal magnetic field (8 T) on the growth rate of glycine crystal from aqueous solution was examined [10]. The rate decreases by about 20% by application of the homogeneous magnetic field. Glycine is amino acid, having no net charge. Therefore, neither Lorentz force nor magnetic force can affect the growth rate. When approaching conditions in which the crystal concentration of glycine becomes non-uniform, some glycine in the solution is deposited as crystals on the crystal surface. It is proposed that the growth rate of glycine crystal is reduced by the magnetic susceptibility force, which prevents the convection necessary for solute transportation from the bulk solution to the crystal surface.

b. Magnetic Force, Magnetic Levitation, and Magnetically Simulated Microgravity

Magnetic force

Chemical Wave Propagation from the Belousov-Zhabotinsky Reaction [8]. MFEs (max. 4 T and $93 \text{ T}^2\text{m}^{-1}$) on the propagation speed of a chemical wavefront from the Belousov-Zhabotinsky reaction were studied in a thin glass tube. The speed is strongly dependent on the propagation direction (downward, upward and horizontal) (Fig. 8). The results are explainable by the magnetic forced-induced convection of the solution at wavefront.

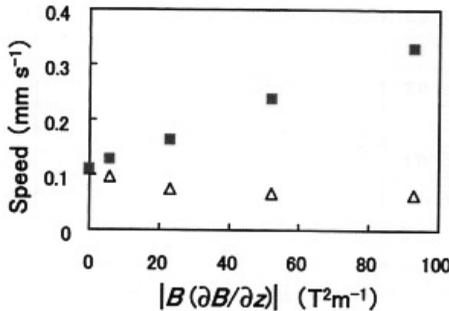


Fig. 8. MFE on the propagation speed in vertical magnetic field:

■ – upward; △ – downward

Table 2. MFE on the salt-water oscillation in vertical MF

B^b (T)	$B\partial B/\partial z^b$	g_{eff}/g^c	Oscillation Period (s)
0	0	1.0	3.3 ± 0.2
10	-1300	0.55	6.3 ± 0.6
13	-900	0.69	4.8 ± 0.5
13	700	1.24	2.7 ± 0.2
11	1100	1.36	2.5 ± 0.2

Salt-Water Oscillator [9]

The effect of a strong vertical magnetic field on a salt-water oscillator composed of salt-water and water was examined. The oscillation period changes drastically as shown in Table 2. The effect is explainable in terms of magnetic force acting on the salt-water and water interface.

Magnetic levitation. An apple falls downward because of gravity. If an upward magnetic force equals to the gravitational force is applied, then the apple is levitated (Fig. 9).

$$mg = (1/\mu_0) \chi B \partial B / \partial z. \quad (12)$$

Therein, m denotes the mass of an apple, g stands for Earth's gravity, and χ is the diamagnetic susceptibility of the apple. The value of $B\partial B/\partial z$ necessary for water levitation is estimated roughly as $1400 \text{ T}^2\text{m}^{-1}$. We can levitate many diamagnetic substances such as water, frogs, cherry tomatoes, and plastic chips [10].

6. Biological Effects of MF

Xenopus laevis development

[11]. Fig. 10 shows MFE on the survival rate of *Xenopus laevis* at

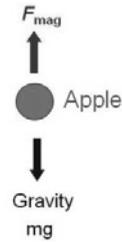


Fig. 9. Magnetic levitation

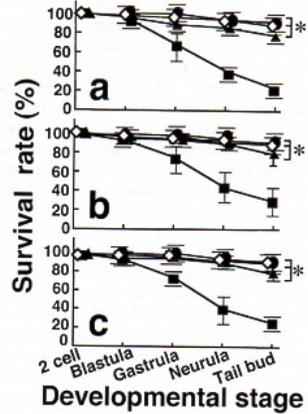


Fig. 10.

a - 15 T, $0 \text{ T}^2\text{m}^{-1}$; b - 11 T, $-1400 \text{ T}^2\text{m}^{-1}$;
c - 12 T, $+1200 \text{ T}^2\text{m}^{-1}$;

- ◇ - untreated control; ■ - treated from uncleaved egg to 2-cell stage;
- ▲ - treated from 2-cell stage to blastula;
- - treated from blastula to neurula

several stages of development. The application of a magnetic field between uncleaved egg to 2-cell stage affects strongly the survival rate.

7. Summary

As described briefly herein, a MF presents great possibilities for affecting various chemical, physical, and biological phenomena. Today the research field described here is called “Magneto-Science” [12]. Magneto-science will become a key basic science supporting materials sciences, nano- and life-sciences, etc. in near future.

References

1. Udagawa C. et al., *J. Photochem. Photobiol. A*, 238, 16 (2012).
2. Nishikiori R. et al., *Appl. Magn. Reson.*, 41, 221 (2011).
3. Udagawa C. et al., *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, 91, 165 (2018).
4. Uechi I. et al., *J. Phys. Chem. B*, 108, 2527 (2004).
5. Duan W. et al., *J. Phys. Chem. B*, 109, 13445 (2005).
6. Fujiwara M. et al., *J. Phys. Chem. A*, 105, 4383 (2001).
7. Sueda M. et al., *Sci. Tech. Adv. Mat.*, 7, 380 (2006).
8. Nishikiori R. et al., *J. Phys. Chem. A*, 115, 4592 (2011).
9. Tanimoto Y. et al., *J. Phys. Soc. Jpn.*, 81, (2012) 094805.
10. <http://www.magneto-science.jp/gallery.html>
11. Kawakami S. et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, 45, 6055 (2006).
12. Yamaguchi M. and Tanimoto Y. (Eds.), *Magneto-Science*, Kodansha/ Springer, Tokyo, 2006.

APPLICATION OF SECOND LAW ANALYSIS TO NANOFLUIDS FLOW

Vincenzo Bianco

*Department of Mechanical, Energy,
Management and Transportation Engineering. University of Genoa (Italy)
vincenzo.bianco@unige.it*

Heat transfer enhancement technologies are widely adopted in several industrial applications, thus, this topic covers an important role also in the research field.

Solutions are applied from refrigeration to aerospace industry and so on in order to develop thermal devices, featured by high efficiency, reduced size, low costs and significant energy save.

In this way, passive or active methods can be adopted. Methods involving special surfaces like extended, coated, rough surfaces, vortex generators, inserts or additives in the working fluids are grouped in the «passive» techniques. Jets, systems involving surface or fluid vibrations, electrostatic fields and so on are listed in the «active method group» which requires external supplies of energy.

A nanofluid is a suspension of nanoparticles, usually metal oxides, within a base fluid, such as water, glycol, or mineral oil. Suspending nanoparticles in a fluid leads to an increase of its thermal properties; in particular, nanoparticles contribute to increase thermal conductivity, resulting in a mixture with higher conductivity with respect to the base fluid (Bianco et al. 2013).

On the other hand, the inclusion of nanoparticles also determines an increase of the mixture viscosity, which, in turn, causes an increase of pressure drop. Therefore, two opposite aspects emerge: enhancement of heat transfer performances and increases of mechanical losses. In light of this, it is of fundamental importance to find an optimal balance of nanoparticles to be dispersed in the base fluid.

The increase of concentration and reduction of particles dimensions contributes to the two aforementioned effects, therefore more parameters should be considered at the same time.

In order to face with this problem, an approach based on the second law analysis, e.g. entropy generation minimization, seems to be the best methodology.

Entropy generation can be seen as the result of two contributions: generation due to heat transfer losses and generation due to mechanical energy losses. These two contributions have to be minimized.

The analysis can be performed as suggested by Bejan (1996), who highlighted that entropy generation represents the irreversibility of a system, therefore by reducing it, a more efficient system is obtained.

The present paper will show how to apply the entropy generation minimization theory to the problem of nanofluid convection, in order to find the optimal concentration of nanoparticles to disperse in the base fluid.

References

1. Bianco, V. Second law analysis of Al₂O₃ – water nanofluid turbulent forced convection in a circular cross section tube with constant wall Temperature / V. Bianco, O. Manca, S. Nardini // *Advances in Mechanical Engineering*. art. no. 920278. – 2013.
2. Bejan, A. Entropy generation minimization / A. Bejan. – Boca Raton: CRC Press, 1996.

**ИССЛЕДОВАНИЕ
ИНТЕГРОДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ,
ВОЗНИКАЮЩИХ В ТЕОРИИ ВЯЗКОУПРУГОСТИ
И ТЕПЛОФИЗИКЕ**

В. В. Власов

*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
Москва*

Аннотация. Работа посвящена исследованию вольтерровых интегродифференциальных 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 интегродифференциальные уравнения в частных производных, возникающие в теории вязкоупругости [4, 15], а также как интегродифференциальные уравнения Гуртина–Пипкина [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) [9].

Ключевые слова: интегродифференциальные уравнения, вязкоупругость, теплоперенос, многофазные среды.

1. Постановка задачи. Основные определения.

Пусть H – сепарабельное гильбертово пространство, A – самосопряженный положительный оператор, $A^* = A \geq \kappa_0$ ($\kappa_0 > 0$), действующий в пространстве H , имеющий компактный обратный оператор, 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 интегродифференциального уравнения второго порядка на положительной полуоси $\mathbb{R}_+ = (0, \infty)$:

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

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

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 $(d_0, +\infty)$, $d_0 > 0$.

Интегродифференциальное 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 $u = \bar{u}(x, t) \in \mathbb{R}^3$ – вектор перемещений вязкоупругой наследственной изотропной среды, среда заполняет ограниченную область $\Omega \subset \mathbb{R}^3$ 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 [15].

В случае, когда оператор $B = 0$, а самосопряженный положительный оператор A реализован как $Ay = -\Delta y$ 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 авторы исследовали вопрос о локализации спектра для оператор-функции $L(\lambda)$, являющейся символом указанного уравнения, и установили корректную разрешимость начальной задачи для уравнения (1) в весовых пространствах Соболева на положительной полуоси.

В работах авторов [11 – 13] проводилось подробное исследование задачи (1), (2) в случае, когда оператор $B = 0$. Подход авторов 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], с. 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 $W_{2,\gamma}^n(\mathbb{R}_+, A_0)$ обозначим пространство Соболева вектор-функций на полуоси $\mathbb{R}_+ = (0, \infty)$ со значениями в H , снабженное нормой

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

Подробнее о пространствах $W_{2,\gamma}^n(\mathbb{R}_+, A_0)$, см. главу 1 монографии [5]. При $n = 0$ полагаем $W_{2,\gamma}^n(\mathbb{R}_+, A_0) \equiv L_{2,\gamma}(\mathbb{R}_+, H)$, 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 $W_{2,\gamma}^n(\mathbb{R}_+, A_0)$ для некоторого $\gamma \geq 0$, удовлетворяет уравнению (1) почти всюду на полуоси \mathbb{R}_+ и начальным условиям (2).

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

Теорема 1. Пусть выполнено условие (5), $f'(t) \in L_{2,\gamma_0}(\mathbb{R}_+, H)$ для некоторого $\gamma_0 \geq 0$ и $f(0) = 0$, кроме того, $\varphi_0 \in H_1$, $\varphi_1 \in H_{1/2}$. Тогда существует такое $\gamma_1 \geq \gamma_0$, что для любого $\gamma > \gamma_1$ задача (1), (2) имеет единственное решение в пространстве $W_{2,\gamma}^n(\mathbb{R}_+, A_0)$, удовлетворяющее неравенству

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

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

Следует отметить, что метод, используемый авторами 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 $W_{2,\gamma}^n(\mathbb{R}_+, A_0)$ вектор-функций на положительной полуоси \mathbb{R}_+ , где A_0 – положительный самосопряженный оператор в гильбертовом пространстве. Доказательств-

во теоремы 1 о разрешимости существенно использует гильбертову структуру пространств $W_{2,\gamma}^n(\mathbb{R}_+, A_0)$, $L_{2,\gamma}(\mathbb{R}_+, H)$, а также теорему Пэли–Винера, в то время как в работе [8] рассмотрено банаховое функциональное пространство 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 u 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 \mathbb{R}_+ и начальным условиям (2).

Теорема 2. 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 3. 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

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

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

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

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 $A^{-1/2}BA^{-1/2}$ допускает ограниченное замыкание в пространстве H . Отсюда следует, что оператор $A^{-1/2}A_0A^{-1/2} = I + A^{-1/2}BA^{-1/2}$ 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 $A_0^{-1/2}AA_0^{-1/2}$, $A_0^{-1/2}BA_0^{-1/2}$ также допускают ограниченные замыкания в пространстве H .

Теорема 4. 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

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

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

В заключение отметим, что в 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. – V. 31. – P. 113 – 126.
2. Ivanov S., Pandolfi L. // Journal of Mathematical analysis and applications. – 2009. – V. 355. – P. 1 – 11.
3. Като, Т. Теория возмущения линейных операторов / Т. Като. – М.: Мир, 1972.

4. Kopachevsky, N. D. Operator approach to Linear / N. D. Kopachevsky, S. G. Krein // Problems of Hydrodynamics. V. 2. Nonselfadjoint Problems for Viscous Fluids. – Berlin: Basel-Boston, 2003.
5. Лионс, Ж. П. Неоднородные граничные задачи и их приложения / Ж. П. Лионс, Э. Мадженес. – М., 1971.
6. Лыков, А. В. Проблема тепло- и массообмена / А. В. Лыков. – Минск: Наука и техника, 1976.
7. Милославский, А. И. Спектральные свойства операторного пучка, возникающего в вязкоупругости / А. И. Милославский / Депонировано в Укр. НИИНТИ. 13.07.87. № 1229-УК87. – Харьков, 1987. – С. 53.
8. Власов В. А., Гавриков А. А., Иванов С. А., Князьков Д. Ю., Самарин В. А., Шамаев А. С. // Современные проблемы математики и механики. – 2009. – Т. 5. – № 1. – С. 134 – 155.
9. Власов, В. В. Современная математика / В. В. Власов, Н. А. Раутиан // Фундаментальные направления. – 2015. – Т. 58. – С. 22 – 42.
10. Власов, В. В. Труды семинара им. И. Г. Петровского / В. В. Власов, Н. А. Раутиан. – 2011. – Т. 28. – С. 75 – 114.
11. Власов, В. В., Современная математика / В. В. Власов, Н. А. Раутиан, А. С. Шамаев // Фундаментальные направления. – 2011. – Т. 39. – С. 36 – 65.
12. Власов, В. В. Спектральный анализ функционально-дифференциальных уравнений / В. В. Власов, Н. А. Раутиан. – М.: МАКС Пресс, 2016. – 488 с.
13. Шкаликов, А. А. Математический сборник / А. А. Шкаликов. – 1988. – Т. 177, № 1. – С. 96 – 118.
14. Работнов, Ю. Н. Элементы наследственной механики твердых тел / Ю. Н. Работнов. – М.: Наука, 1977.
15. Ильюшин, А. А. Основы математической теории термовязкоупругости / А. А. Ильюшин, Б. Е. Победря. – М.: Наука, 1970. – 280 с.

RESEARCH INTEGRODIFFERENTIAL EQUATIONS, ARISING IN THE THEORY OF VISCOELASTICITY AND THERMAL PHYSICS

V. V. Vlasov

Moscow State University named after M. V. Lomonosov, Moscow

Abstract. The work is devoted to the study of Voltaire integro-differential equations with unlimited operator coefficients in Hilbert space. The equations under consideration are an abstract hyperbolic equation perturbed by terms containing Volterra integral operators. These equations can be implemented as integro-differential equations in partial derivatives arising in the theory of viscoelasticity [4, 15], as well as integro-differential equations of Gurtin–Pipkin [1, 6], which describe the process of heat propagation in media with memory with finite speed, in addition, these equations arise in the problems of averaging in multiphase media (Darcy law) [9].

Keywords: integro-differential equations, viscoelasticity, heat transfer, multiphase media.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИНТЕНСИФИЦИРОВАННОГО ТЕПЛООБМЕНА

**Ю. Ф. Гортышов, И. А. Попов, А. В. Щелчков,
А. А. Миронов, А. Н. Скрыпник**

*Казанский национальный исследовательский
технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ, Казань
Juriy.gortyshov@ksu-kai.ru*

Аннотация. Предложены теплообменные поверхности для интенсификации теплоотдачи при турбулентном течении теплоносителя, выполненные в виде периодически нанесенных углублений и выступов различной формы. Представлены результаты первичных экспериментальных теплогидравлических исследований данных теплообменных поверхностей и их обобщение. Показаны результаты применения полученных результатов при производстве эффективных теплообменных аппаратов.

Ключевые слова: интенсификация теплоотдачи, гидросопротивление, эффективность, теплообменные аппараты.

Введение. К современному теплообменному оборудованию предъявляется большое количество технических требований, в том числе по обеспечению передачи требуемого количества тепла от одной среды к другой с получением необходимых конечных температур при возможно большей интенсивности теплообмена, при возможно меньших габаритах и наименьшей удельной металлоемкости. При эксплуатации теплообменных аппаратов также возникают задачи защиты теплообменных поверхностей от загрязнения и коррозии.

Описанные требования повышения эффективности и компактности теплообменных аппаратов в основном решаются применением новых схем компоновок, использованием перспективных способов и технологий интенсификации теплоотдачи, в том числе организации вихревых и отрывных течений. Данные методы интенсификации по существу снижают термическое сопротивление пристенных слоев при конвективном теплообмене в теплообменном аппарате. Необходимо отметить, что использование вихревых потоков уменьшает загрязнение теплообменных поверхностей, сохраняет высокий уровень теплопередачи при продолжительном периоде эксплуатации теплообменного оборудования.

В современных теплообменных аппаратах в основном используют малоэнергоёмкие, пассивные методы интенсификации теплоотда-

чи, например профилированные (дискретно-шероховатые) поверхности. Это один из первых предложенных способов интенсификации теплоотдачи при однофазной конвекции. Данный способ отличается технологичностью, а также высокой теплогидравлической эффективностью. Структура профиля поверхности может являться неотъемлемой частью теплообменной поверхности (равномерно нанесенные или дискретные двух-, трехмерные выемки/выступы и т.д.) или являться элементами проволочных или прочих вставок. В первом случае профиль достигается механической обработкой поверхности (например, накатка, нарезание резьбы, нарезание пазов), штамповкой, отливкой, сваркой. В результате возможно получить практически бесконечное количество разнообразных геометрических конфигураций элементов профиля поверхности.

В данной работе проведены исследования теплогидравлических характеристик труб со сферическими и кольцевыми выступами при вынужденном течении теплоносителя, а также испытания кожухотрубного теплообменного аппарата со сменными пучками труб, на которых нанесены системы сферических и кольцевых выступов, для различных пар теплоносителей, в широком диапазоне режимных и конструктивных параметров.

Основные результаты исследований

1. Обоснована новая научная концепция оценки функциональных достоинств поверхностных вихревых генераторов-интенсификаторов конвективного теплообмена в каналах по степени интенсификации вторичного течения. Рост тепловой и теплогидравлической эффективности генераторов находится в прямой зависимости от величины максимальной скорости вторичного течения.

2. Предложены и численно обоснованы новые рациональные формы поверхностных генераторов спиралевидных высокоинтенсивных вихрей в виде овально-траншейных углублений [1] относительно большого удлинения ($l_k/b = 5,57$ и $l_k/b = 6,78$), расположенных под углом 45° к потоку, и относительной глубиной $h/d_k = 0,13$. Данная геометрия углублений позволяет повысить скорость вторичного течения до величин порядка характерной скорости потока в стесненном канале (среднемассовой или максимальной), что в несколько раз превышает скорости вторичного течения, индуцированные традиционными симметричными выемками – ямками, обеспечивая значительное превосходство овально-траншейных углублений по тепловой и теплогидравлической эффективности. Относительная тепловая эффективность для овально-траншейного углубления составляет $Nu_{(1)}/Nu_{0(1)} = 1,243$, в то время как для сферической выемки она имеет величину $Nu_{(1)}/Nu_{0(1)} = 1,063$, причем

гидравлические потери на участке с овально-траншейным углублением лишь на 13% превышают аналогичные потери для участка со сферической выемкой. Все результаты численных исследований верифицированы в ходе проведения экспериментальных исследований локальных и осредненных теплогидравлических характеристик, в том числе с использованием высокоскоростной тепловизионной видеосъемки.

3. Обнаружен эффект двукратного повышения относительной теплоотдачи в отрывной зоне в верховье овально-траншейного углубления с относительным удлинением $l_k/b = 4,5 \dots 6,78$ (при постоянной площади пятна), обусловленный увеличением в полтора раза абсолютной величины относительного трения. Установлено, что при обтекании симметричных выемок, для которых в отрывных зонах трение по модулю уменьшается, существенно снижается теплообмен по сравнению с течением в гладком канале.

4. Обнаружена перестройка отрывного течения в овально-траншейном углублении по мере уменьшения ее ширины при постоянной площади пятна, связанная с резким сокращением длины отрывной зоны, интенсификацией возвратного течения ней и формированием в остальной части выемки безотрывного закрученного потока.

5. В проведенном обобщении материалов по вихревой интенсификации теплообмена значительно расширены диапазоны основных безразмерных геометрических параметров в области ламинарных, переходных, турбулентных чисел $Re = 200 \dots 105$ при вынужденном течении теплоносителя в трубах с кольцевыми $d/D = 0,98 \dots 0,74$, $t/D = 0,25 \dots 1,00$ и полусферическими выступами $d/D = 0,60 \dots 0,98$, $t/D = 0,276 \dots 1,558$, $s/D = 0,155 \dots 1,682$, $f = 1,001 \dots 2,260$. Получены графические зависимости для определения границ ламинарно-турбулентного перехода Re и $Re_{кр2}$, позволяющие оценивать влияние основных режимных и геометрических параметров на коэффициенты гидравлического сопротивления и средней теплоотдачи. Также предложены обобщающие зависимости для расчета коэффициентов гидравлического сопротивления и средней теплоотдачи исследованных труб для ламинарного, переходного и турбулентного режимов течения.

6. Сформирован банк данных коэффициентов гидравлического сопротивления и средней теплоотдачи плоских каналов с односторонним расположением цилиндрических выемок $h/d = 0,1 \dots 0,5$ в области ламинарных, переходных, турбулентных чисел Рейнольдса $Re_D = 200 \dots 2,3 \cdot 10^4$. Выполнен анализ эффективности по критерию аналогии Рейнольдса исследованных каналов. Установлено влияние основных режимных и конструктивных параметров цилиндрических выемок на коэффициен-

ты гидросопротивления и средней теплоотдачи каналов с цилиндрическими выемками. Получены обобщающие зависимости для каналов с цилиндрическими выемками для ламинарного и турбулентного режимов течения.

7. Выполнено сравнение расчетных и экспериментальных результатов по локальным и интегральным теплогидравлическим характеристикам плоского канала с одиночной цилиндрической выемкой и пакетами цилиндрических выемок, относительной глубиной $h/d = 0,1 \dots 0,2$. На основе анализа струйно-вихревой структуры течения в цилиндрической выемке установлены особенности механизма интенсификации теплообмена, связанные с взаимодействием втекающего в выемку потока с боковыми стенками, обуславливающего кардинальное увеличение теплоотдачи на боковых и наветренной гранях. Суммарная теплоотдача в выемке, определенная по площади ее пятна, возрастает до $Nu_m/Nu_{m0} = 1,68$ раза по сравнению с соответствующим участком гладкой стенки плоскопараллельного канала при росте гидравлических потерь до $\xi_m/\xi_{m0} = 1,47$ раза. С учетом всей площади внутренней поверхности тепловая эффективность цилиндрической выемки умеренной глубины оказывается существенно меньше и составляет $Nu'_m/Nu_{m0} = 1,22$.

8. Верификация модифицированной с учетом влияния кривизны линий тока в рамках подхода Роди–Лещинера–Исаева полуэмпирической модели переноса сдвиговых напряжений и пакета программ VP2/3 «Thermophysics» на задачах конвективного теплообмена в стесненном канале с цилиндрическими, сферическими выемками и овално-траншейными углублениями при сравнении численных прогнозов с экспериментальными данными.

9. Впервые разработаны диаграммы режимов обтекания поверхностей с цилиндрическими и овално-траншейными выемками. Дана оценка эффективности по критерию аналогии Рейнольдса исследованных труб с кольцевыми и полусферическими выступами в диапазоне чисел Рейнольдса $Re_D = 200 \cdot 10^5$. Установлены рациональные параметры кольцевых и полусферических выступов в исследованном диапазоне для обеспечения максимальной тепловой и теплогидравлической эффективности.

10. Проведено испытание образцов кожухотрубных теплообменных аппаратов транспортного оборудования с поверхностными вихрегенераторами различной формы, в том числе кольцевых, полусферических выступов, овално-траншейных выемок/выступов при различных сочетаниях пар теплоносителей в широком диапазоне режимных параметров при фиксированных весогабаритных характеристиках. Установлено повышение тепловой мощности испытанных теплообменных

аппаратов при числах Рейнольдса $Re = 4 \cdot 10^3 \dots 2 \cdot 10^4$ течения теплоносителей в трубах до 1,25 – 3 раз при росте гидравлического сопротивления в системе теплообменных труб до 1,1 – 3,6 раз.

Заклучение. Рассмотренные в работе промышленно перспективные интенсификаторы теплообмена были применены при разработке и производстве теплообменного аппарата-охладителя системы рециркуляции газов большегрузного автомобиля, в предпусковом подогревателе силовой установки, судовом водо-водяном подогревателе и т.д. В результате было получено повышение эффективности как самих теплообменных аппаратов, так и экологических и технических характеристик энергоустановок, в составе которых применены указанные теплообменные аппараты.

Работа выполнена в рамках выполнения проекта 14.Z50.31.003 под руководством ведущего ученого С. А. Исаева и грантов РФФИ 18-38-00356-мол_a, 17-58-04015Бел_мол_a.

Список литературы

1. Заявка на изобретение 2018121892. Российская Федерация, МПК F 28 F 3/04. Теплообменная поверхность / С. А. Исаев, А. И. Леонтьев, П. А. Баранов, И. А. Попов, А. В. Щелчков, Ю. Ф. Гортышов, А. Н. Скрыпник, А. А. Миронов – приоритет 18.06.2018. – 6 с.

PROCESS SIMULATION OF HEAT TRANSFER ENHANCEMENT

Yu. F. Gortyshov, I. A. Popov, A. V. Shchelchkov,

A. A. Mironov, A. N. Skrypnik

*Kazan National Research Technical University n.a. A. N. Tupolev – KAI,
Kazan*

Juriy.gortyshov@ksu-kai.ru

Abstract. In the article new heat exchange surfaces for heat transfer intensification under turbulent flow conditions of the heat carrier are presented. Turbulent promoters on the heat transfer surfaces are executed in the form of periodically protrusions and dimples of various shapes. The initial experimental results of thermohydraulic studies for such heat exchange surfaces and its generalization are presented. Possible applications of obtained results for the production of efficient heat exchangers were illustrated.

Keywords: heat transfer enhancement, hydraulic resistance, efficiency, heat exchangers.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КИРПИЧНОЙ КЛАДКИ, СОДЕРЖАЩЕЙ СМЕСИ СОЛЕЙ

В. А. Езерский¹, Н. В. Кузнецова²

¹*Белостокский технический университет, Республика Польша*

²*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный
технический университет», Тамбов
nata-kus@mail.ru*

Аннотация. На основании результатов эксперимента предложено уточнить методику определения требуемой парозащиты наружных стен с учетом допустимых значений относительной влажности воздуха в поровом пространстве засоленного стенового материала.

Ключевые слова: коэффициент паропроницаемости, коэффициент теплопроводности, солесодержание, сорбционная влажность.

Наружные ограждающие конструкции цехов промышленных предприятий, кроме температурно-влажностных воздействий, подвержены воздействию производственной среды. На ряде производств, технологический процесс которых связан с переработкой водорастворимых и гигроскопических солей, происходит постепенное накопление солей в поровом пространстве стеновых материалов. Присутствие солей в материалах вызывает изменение их теплофизических характеристик, в первую очередь, повышение сорбционной влажности [1]. Это приводит к наступлению отказов ограждений по эксплуатационным качествам, прежде всего, по влагозащитной функции [2].

Разработка мероприятий по улучшению влажностного режима наружных стен, эксплуатируемых в условиях воздействия солевой производственной среды, невозможна без учета данных об изменении сорбционных свойств стеновых материалов при содержании в них солей. Для решения этой задачи требуется экспериментальное исследование сорбционного увлажнения солесодержащих материалов.

Для прогнозирования изменения сорбционных свойств кирпичной кладки, содержащей соли, использовался экспериментально-статистический подход.

В качестве факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на сорбционное влагосодержание, рассматривались относительная

влажность воздуха, а также вид и количество соли, содержащейся в материале стен. Кроме того, результаты натуральных исследований наружных стен цеха тринатрийфосфата (ТНФ) ОАО «Воскресенские минеральные удобрения» показали, что в кирпичной кладке стен присутствуют смеси двух солей (Na_3PO_4 и Na_2CO_3) переменного состава [2]. Так как фактор вид соли представлял в нашем случае двухкомпонентную систему, то смесевой состав учитывался массовой долей каждой соли в смеси. Массовые доли Na_3PO_4 (фактор z_1) и Na_2CO_3 (фактор z_2) в солевой смеси изменялись от 0 до 1, при этом предполагалось, что $z_1 + z_2 = 1$.

При планировании эксперимента диапазон изменения относительной влажности воздуха γ_v (фактор x_1) выбирался с учетом реальных условий эксплуатации ограждающих конструкций. Рассматривались три уровня из этого диапазона: 60 (–1); 80 (0) и 98% (+1).

Значения содержания материалов назначались по результатам натуральных исследований наружных стен цеха ТНФ [2] и принимались равными: 0,5 (–1); 2,0 (0) и 3,5% (+1).

Предполагалось, что зависимость сорбционного влагосодержания y от рассматриваемых факторов x_1, x_2, z_1, z_2 может быть описана моделью в виде приведенного полинома неполного третьего порядка, коэффициенты которого зависели от значений эксплуатационных факторов (x_1 и x_2) и описывались, в свою очередь, полиномом второго порядка.

Для получения формализованного описания процесса сорбции в зависимости от рассматриваемых факторов применялось двухъярусное планирование лабораторного эксперимента: план на диаграммах «состав–свойство» (для смесевых факторов) объединялся с факторным планом (для эксплуатационных факторов) [3].

Экспериментальное определение сорбционной влажности стеновых материалов проводилось эксикаторным методом [4]. Соли вводились в образцы в виде растворов некоторой концентрации в количестве, обеспечивающем требуемые уровни содержания в материале [5].

По результатам эксперимента с помощью регрессионного анализа были рассчитаны параметры моделей $y = f(x_1, x_2, z_1, z_2)$ для кирпича глиняного обыкновенного (1800 кг/м^3) и цементно-песчаного раствора (1800 кг/м^3). Учитывая массовое соотношение кирпича и цементно-песчаного раствора в конструкции стены 3:1 и полагая справедливость принципа аддитивности, из рассчитанных моделей получена обобщенная модель для кирпичной кладки вида:

$$\begin{aligned}
y_{\text{кк}} = & (1,59 + 3,00x_1 + 1,35x_2 + 1,43x_1x_2 + 2,63 x_1^2 + 0,28 x_2^2)z_1 + \\
& + (1,75 + 4,19x_1 + 2,19x_2 + 2,35x_1x_2 + 4,32 x_1^2 + 0,22 x_2^2)z_2 + \\
& + (0,45 + 0,16x_1 + 0,50x_2 + 0,50x_1x_2 + 0,47 x_1^2 - 0,54 x_2^2)z_1z_2 + \\
& + (1,71 - 0,83x_1 - 0,95x_2 - 1,31x_1x_2 - 1,33 x_1^2 - 0,89 x_2^2)z_1z_2(z_1 - z_2).
\end{aligned}$$

При практической реализации построенной модели (1) принималось во внимание, что СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий регламентирует расчетное и предельно допустимое влагосодержание стеновых материалов в ограждающих конструкциях. Так, расчетное влагосодержание кирпичной кладки для помещений с влажным режимом (условия эксплуатации – Б) равно 2%, а предельно допустимое – 3,5%.

Принимая конкретизированные значения смесевых факторов в модели можно получить зависимость сорбционного влагосодержания стенового материала только от эксплуатационных факторов x_1 и x_2 . Так, по результатам натурных исследований выявлено, что в кирпичной кладке наружных стен отделения нейтрализации 2-й ступени цеха ТНФ (вблизи нейтрализаторов) содержится солевая смесь с соотношением компонентов $z_1 = 0,2$ (Na_3PO_4), $z_2 = 0,8$ (Na_2CO_3) [2]. Математические описания предельно допустимых условий эксплуатации наружных стен этого отделения цеха ТНФ имеют вид:

$$\begin{aligned}
0,93 + 3,91x_1 + 2,84x_2 + 2,24x_1x_2 + 4,47x_1^2 - 0,33x_2^2 & \leq 2, \\
0,93 + 3,91x_1 + 2,84x_2 + 2,24x_1x_2 + 4,47x_1^2 - 0,33x_2^2 & \leq 3,5.
\end{aligned}$$

Для использования в практических расчетах построен график зависимости $w(y)$ от $\gamma_{\text{в}}(x_1)$ и $c(x_2)$ при значениях смесевых факторов, соответствующих условиям эксплуатации наружных стен отделения нейтрализации 2-й ступени цеха ТНФ (рис. 1). Изолинии сорбционного влагосодержания, равные 2 и 3,5%, определяют множество пар значений относительной влажности и солесодержания, удовлетворяющих предельно допустимому состоянию увлажнения кирпичной кладки.

С помощью графика или неравенств при известном солесодержании $c(x_2)$ можно рассчитать допустимую относительную влажность в поровом пространстве материала $\gamma_{\text{в}}(x_1)$. Используя величины $\gamma_{\text{в}1}$ (при $w = 2\%$) и $\gamma_{\text{в}2}$ (при $w = 3,5\%$) в расчете сопротивления паропрооницанию ограждения в качестве допустимых значений относительной влажности воздуха в порах кирпичной кладки, определяется требуемое сопротивление паропрооницанию внутреннего пароизоляционного покрытия. Устройство такой внутренней пароизоляции позволит обеспечить нормальный влажностный режим наружных стен, эксплуатируемых в условиях воздействия солевой среды рассматриваемого цеха.

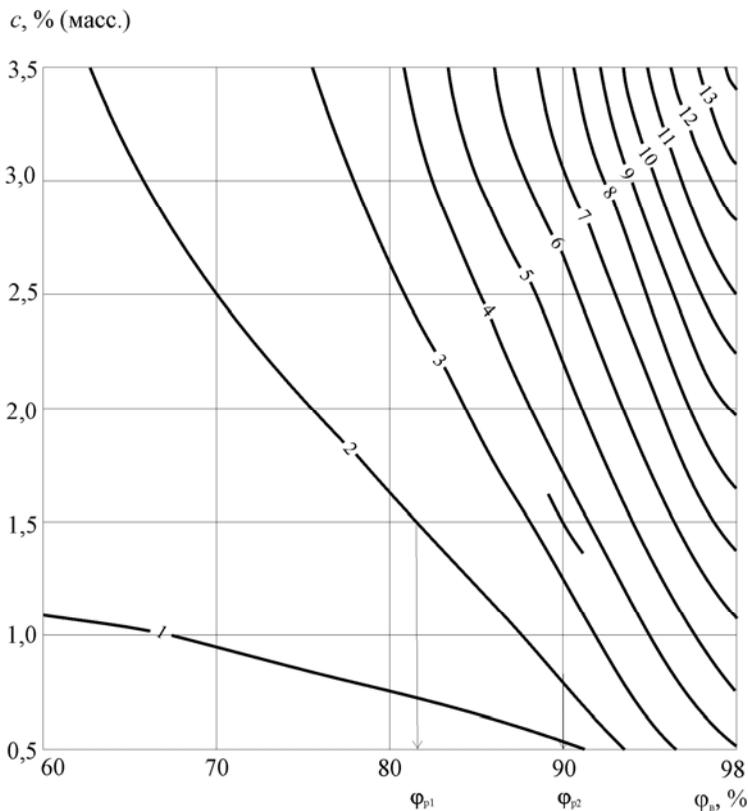


Рис. 1. Изолинии сорбционного влагосодержания кирпичной кладки $\gamma_0 = 1800 \text{ кг/м}^3$ при изменении относительной влажности воздуха ϕ , %, и массового солесодержания c , %, в стенах цеха ТНФ (при значениях смесевых факторов $z_1 (\text{Na}_3\text{PO}_4) - 0,2$; $z_2 (\text{Na}_2\text{CO}_3) - 0,8$)

Список литературы

1. Езерский, В. А. Прогнозирование сорбционной влажности кирпичной кладки, содержащей смеси солей / В. А. Езерский, Н. В. Кузнецова // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2002. – № 9. – С. 12–13.
2. Езерский, В. А. Воздействие производственной среды цеха ТНФ АООТ «Воскресенские минеральные удобрения» на наружные ограждающие конструкции / В. А. Езерский, Н. В. Кузнецова // Тр. ТГТУ: сб. науч. статей молодых ученых и студентов. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2000. – Вып. 5. – С. 206 – 210.

3. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей: справочное издание / В. З. Бродский, Л. И. Бродский, Т. И. Голикова и др. – М.: Металлургия, 1982. – 752 с.
4. Методика определения влажностных характеристик строительных материалов / НИИСМ Госстроя УССР. – Киев, 1970. – 48 с.
5. Аксенова, И. В. Методика лабораторного засоления строительных материалов / И. В. Аксенова, В. А. Езерский // Музееведение и охрана памятников. Реставрация и консервация музейных ценностей: науч. реф. сб. – М., 1981. – Вып. 6. – С. 18 – 22.

THERMAL CHARACTERISTICS OF THE BRICKLAYING CONTAINING MIXES OF SALTS

V. A. Ezerskiy¹, N. V. Kuznetsova²

¹*Bialystok Technical University, Poland*

²*Tambov State Technical University, Tambov*
nata-kus@mail.ru

Abstract. On the basis of results of an experiment it is offered to specify a technique of definition of the required protection against vaporous moisture of external walls taking into account admissible values of the relative humidity of air in a pore space of the salted wall material.

Keywords: vapor permeability coefficient, heat conductivity coefficient, salinity, getter humidity.

ТЕПЛОЕМОСТЬ КОНДЕНСИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ. МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

А. Д. Ивлиев

ФГАОУ ВО «Российский государственный
профессионально-педагогический университет», Екатеринбург

Аннотация. Рассмотрены основные микроскопические модели, позволяющие описать температурные зависимости теплоемкостей конденсированных веществ при высоких температурах.

Ключевые слова: температура, теплота, теплоемкость, структурные элементы вещества, степени свободы.

Введение. Основные определения. Конденсированные вещества – это жидкости и твердые тела. С микроскопической точки зрения они являются агрегатом большого числа частиц – структурных элементов (СЭ), взаимодействующих между собой. Микроскопические теории, в отличие от термодинамики, рассматривают движение СЭ при описании тепловых свойств веществ. Существует несколько моделей, и соответственно, несколько теорий, позволяющих описать реально наблюдаемые свойства. Ниже в общих чертах мы ознакомимся с некоторыми из них.

Термин «высокие температуры» не имеет строгого определения, и в данном случае мы будем рассматривать температуры большие, чем температура Дебая. Для многих практически важных материалов это означает, что вещество должно быть нагрето, т.е. иметь температуру выше комнатной.

Теплоемкость являются основным теплофизическим свойством. Под теплоемкостью C мы будем понимать теплоту, которую необходимо сообщить телу, чтобы его температура повысилась на 1 К [1]. Кроме общей теплоемкости рассматривают, в частности, удельную $C^{уд}$, молярную C^M и другие. Величина теплоемкости в общем случае зависит от режима нагрева. Экспериментально, обычно, измеряется изобарная теплоемкость C_p , а теоретические модели проще рассматривать для изохорного режима C_v . Для конденсированных веществ (в отличие от газов) количественная разница между этими теплоемкостями невелика [1], поэтому в дальнейшем мы будем считать их рав-

ными. Теплоемкость является неравновесным свойством. Теплоемкость – одно из немногих теплофизических свойств, микроскопический расчет которых производится с относительно небольшой ошибкой, обычно не более 10%.

Конденсированные вещества, в частности металлы, теоретически рассматриваются как совокупность СЭ двух типов: ионных остовов (т.е. решетки) и коллективизированных электронов. Это сложная взаимодействующая система. Учитывая, однако, значительную разницу в массах ионов решетки и электронов, можно в первом приближении рассматривать их энергии независимо (это так называемое адиабатное приближение). Мы также воспользуемся этим приближением.

Основные механизмы накопления тепла конденсированными телами. Оценка теплоемкости. Любое конденсированное вещество содержит *решетку* – ионный, атомарный или молекулярный остов. Естественно, что в любом веществе теплота накапливается, по крайней мере, решеткой. Рост температуры связан с увеличением энергии СЭ решетки, что связано как с возрастанием кинетической, так и потенциальной энергий. Основной тип движения СЭ – колебательный. Обычно рассматривается гармоническое приближение, при котором потенциальная энергия изменяется пропорционально квадрату смещения из положения равновесия. Этот рост энергии, и следовательно, теплоемкость решетки, нетрудно вычислить в различных моделях: классической и квантовых [2]. При высоких температурах, однако, эти модели дают одинаковый результат: молярная теплоемкость постоянна и равна $3R$ (где R – универсальная газовая постоянная). Данные модели исходят из важного результата статистической физики – теоремы о равнораспределении энергии по степеням свободы, доказанной Л. Больцманом.

В ряде случаев оказываются заметны ангармонические явления [3], которые приводят к нарушению теоремы о равнораспределении энергии по степеням свободы СЭ. Вследствие чего появляется температурная зависимость теплоемкости. Многочисленные расчеты, выполненные, как правило, в рамках квантовой механики, показывают, что за счет ангармонизма возникает дополнительное слагаемое в теплоемкости, линейно изменяющееся при нагреве. За счет ангармонизма возможны и рост, и падение теплоемкости. Параметры задач, используемые авторами данных теоретических работ, не позволяют просто интерпретировать полученные результаты. Во всяком случае, при возникновении подозрения на возможный вклад ангармонических явле-

ний в теплоемкость, необходимо изучить температурную зависимость коэффициента линейного расширения вещества в данном интервале температур. Ангармонические вклады в теплоемкость, как правило, оказываются заметными в тех случаях, когда происходит аномальное изменение коэффициента линейного расширения вещества.

Отмеченное выше оказывается практически применимо к металлам, СЭ которых являются взаимодействующими материальными точками, колеблющимися около узлов решетки. Часто, однако, конденсированные вещества состоят из СЭ, имеющих собственную сложную структуру (например, молекулярные вещества). Благодаря этому возникают внутренние степени свободы, т.е. какие-либо движения компонентов внутри СЭ. Такие движения приводят к дополнительным вкладам в теплоемкость, возникающим в тех интервалах температур, в которых происходят эти внутренние движения. Данные процессы имеют место и в некоторых металлах, поскольку электронная структура ионов может измениться при нагреве. Как правило, влияние внутренних степеней свободы проявляется в том, что на температурной зависимости теплоемкости возникает ступенчатое изменение, либо в некотором интервале температур возникает локальный максимум.

В сложных веществах, например, в ионных кристаллах, возможны два типа колебаний СЭ, называемых акустическими и оптическими модами [3]. Оптические моды соответствуют случаю, когда СЭ различного химического состава движутся навстречу друг другу, а акустические – когда движения происходят в одну сторону. От однородных веществ данные вещества отличаются тем, что их колебательный спектр более разнообразен, имеет оптическую ветвь. В принципе, существование оптической ветви в колебательном спектре СЭ может привести к появлению вклада в теплоемкость, однако обычно это должно происходить при весьма высоких температурах, поэтому практически данный вклад не наблюдаем.

Во многих конденсированных веществах возможны не только колебательные, но и поступательные и вращательные движения СЭ [4], вследствие чего возникают такие вклады в кинетическую энергию решетки, и соответственно в теплоемкость, как «прыжковый» и (или) «диффузионный» и вращательный. Следовательно, при расчете теплоемкости необходимо учитывать еще и поступательные и вращательные степени свободы. Вклады в теплоемкость, создаваемые этими видами движения, не зависят от температуры, однако количество участвующих в этих движениях СЭ изменяется с температурой, благодаря чему также возникает температурная зависимость теплоемкости. Сущест-

венно, что долю СЭ, участвующих в этих процессах часто не удается точно определить, благодаря чему точность расчетов теплоемкости снижается.

По мере повышения температуры в решетке происходит все более интенсивное образование дефектов. Наиболее заметный вклад в теплоемкость дают вакансии (дефекты Шоттки) [1]. Рост числа вакансий происходит по экспоненциальному закону, по такому же закону возрастает и теплоемкость веществ [5]. Обычно этот вклад заметен при достаточно высоких температурах. В частности, вакансионный вклад можно обнаружить вблизи температур плавления, где концентрация вакансий может достигать единиц процентов.

Энергоемкими процессами, происходящими в решетке при изменении внешних параметров являются фазовые переходы. В конденсированных веществах происходят фазовые переходы нескольких типов, которые условно делят на две группы: фазовые переходы первого и второго рода. С энергетической точки зрения фазовые переходы первого рода характеризуются важным параметром – теплотой фазового перехода, которая необходима для изменения потенциальной энергии взаимодействия СЭ. Теоретически, эта теплота должна быть передана телу при постоянной температуре – температуре фазового перехода $T_{ФП}$. По определению скрытая теплота не должна давать вклад в теплоемкость. Реально, однако, при высоких температурах возникают различные причины, приводящие к «размытию» фазового перехода, в результате чего он наблюдается не строго при температуре $T_{ФП}$, а в некотором диапазоне температур. Следствием этого является то, что при измерении теплоемкости возникает вклад, определяемый скрытой теплотой фазового перехода. В принципе, часто бывает необходимо разделять эти вклады. О методах разделения будет сказано ниже. Сама по себе решеточная теплоемкость при высоких температурах по разные стороны от $T_{ФП}$ имеет близкие значения.

Прочие фазовые переходы относятся к фазовым переходам второго рода. Соответствующие аномалии теплоемкости имеют вид локальных максимумов различной формы. К настоящему времени создано много моделей как фазовых переходов второго рода вообще, так и конкретных, например, перехода ферромагнетик-парамагнетик. Анализ данных моделей показывает, что действительно, фазовый переход сопровождается появлением аномалии теплоемкости, например, типа λ -точки. Однако практически использовать эти модели для проведения количественных оценок при высоких температурах оказывается нелегко, по-

скольку точность измерения теплоемкости, как правило, бывает невелика, и сделать надежный однозначный вывод в пользу той или иной модели невозможно.

На результаты измерения теплоемкости большое влияние оказывают и факторы, имеющие физико-химическую природу. По мере нагрева при высоких температурах в исследуемом образце могут, например, протекать химические реакции, происходить испарение легко летучих компонентов. Данные процессы энергоемкие, и как правило, дают заметный вклад в результаты измерений.

Кроме решетки в проводящих материалах вклад в теплоемкость дают *коллективизированные электроны*. Электроны, обладая очень малой массой, сохраняют квантовые свойства в широком диапазоне температур: от нуля кельвинов до температур в десятки тысяч кельвинов. Это значит, что свойства электронов могут быть оценены только на основании квантовых моделей. Простейшая из этих моделей – газовая, и электроны являются СЭ газа [1 – 3]. Взаимодействие электронов между собой не рассматривается, тогда в соответствии с теоремой о равномерном распределении энергии по степеням свободы каждый электрон имеет три поступательные степени свободы. Электроны – фермионы, для которых справедлив принцип запрета Паули. В соответствии с этим принципом, нагреваться (т.е. получать тепловую энергию при нагреве) могут не все электроны, а только те, энергии которых принадлежат слою порядка kT (где k – постоянная Больцмана) вблизи значения химического потенциала электронов. Иными словами, в процессе нагрева происходит постепенное увеличение числа электронов, получающих тепловую энергию.

Данная особенность приводит к тому, что теплоемкость электронов оказывается зависящей от температуры. Газовая модель позволяет получить формулу, в соответствии с которой электронная теплоемкость пропорциональна произведению температуры и плотности состояний коллективизированных электронов вблизи значения химического потенциала (которая тоже изменяется с температурой). Теплоемкость электронов в металлах бывает практически заметна либо при очень низких температурах (обычно, ниже 10 К), либо при высоких (выше температуры Дебая), когда у переходных металлов она может составлять 10% от величины теплоемкости решетки. Именно электронная теплоемкость обеспечивает рост общей теплоемкости металла при высоких температурах.

Разделение вкладов в теплоемкость. Из изложенного понятно, что имеется достаточно большое количество причин, приводящих

к появлению вкладов в реально измеряемую теплоемкость. Часто бывает необходимо разделить эти вклады, чтобы видеть причины, приводящие к изменению теплоемкости. Существует несколько путей решения данной задачи.

Один из путей основан на учете *характера температурной зависимости* того или иного вклада. При температурах выше Дебаевской колебательный вклад решетки приобретает постоянное значение. Следовательно, наличие температурной зависимости теплоемкости указывает на наличие иных причин, среди которых могут проявиться вклады от ангармонизма колебаний СЭ, либо от внутренних степеней свободы. В последнем случае эти вклады могут быть в виде локальных максимумов, либо в виде ступенчатого изменения теплоемкости. Такого же типа особенности теплоемкости возникают и за счет поступательных и вращательных движений СЭ. Вакансионный вклад имеет экспоненциально нарастающий вид. Подобного же типа аномалии могут создавать и фазовые переходы, и химические превращения в веществе. Для понимания возможности существования этих дополнительных вкладов необходимы сведения о свойствах СЭ, а также о характере изменения коэффициента линейного расширения, вязкости и других свойств исследуемого вещества. Естественно, что в случае проводящих материалов необходимо оценить и величину электронной составляющей теплоемкости.

Второй путь основан на *динамических свойствах различных механизмов* накопления теплоты. Выделить различные вклады можно, используя метод гармонического теплового воздействия, позволяющего измерить теплоемкость вещества при той или иной частоте колебаний температуры образца. При низких частотах теплового воздействия проявляются все вклады. Однако по мере повышения частоты постепенно будут «выключаться» самые инерционные вклады. Среди них химический, затем вклад от структурных фазовых переходов первого рода, от наиболее инерционных внутренних механизмов в СЭ, а затем и от вакансий. Самыми малоинерционными являются электронный вклад и вклад от колебаний решетки.

Вывод. Существуют методы, позволяющие оценить вклад тех или иных механизмов накопления тепла в теплоемкость вещества. Тем самым создается возможность для прогнозирования теплоемкости конденсированных веществ.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 11-08-00275 и № 14-08-00228).

Список литературы

1. Ивлиев, А. Д. Физика / А. Д. Ивлиев. – 2-е изд., испр. – СПб.: Изд-во «Лань», 2016. – 672 с.
2. Анималу, А. Квантовая теория кристаллических твердых тел / А. Анималу. – М.: Изд-во «Мир», 1981. – 574 с.
3. Ашкрофт, Н. Физика твердого тела / Н. Ашкрофт, Н. Мермин. – М.: Изд-во «Мир», 1979. – 422 с.
4. Крокстон, К. Физика жидкого состояния. Статистическое введение / К. Крокстон. – М.: Изд-во «Мир», 1978. – 400 с.
5. Крафтмахер, Я. А. Теплоемкость при высоких температурах и образование вакансий в тугоплавких металлах / Я. А. Крафтмахер // Исследования при высоких температурах: сборник. – Новосибирск: Наука, 1966. – С. 5 – 54.

HEAT OF CONDENSED MATERIALS AT HIGH TEMPERATURES. MICROSCOPIC MODELS

A. D. Ivliyev

Russian State Vocational-Pedagogical University, Ekaterinburg

Abstract. The basic microscopic models that allow describing the temperature dependences of heat capacities of condensed matters at high temperatures are considered.

Keywords: temperature, heat, heat capacity, structural elements of matter, degrees of freedom.

МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НАНОЖИДКОСТЕЙ

С. Х. Мирзоев¹, М. М. Сафаров¹, М. М. Гуломов², М. М. Холиков³,
Д. Ш. Хакимов⁴, С. С. Рафиев⁴, А. Р. Раджабов⁴, Г. Н. Нейматов⁴

¹Филиал МГУ им. М. В. Ломоносова, Душанбе, Таджикистан
mahmad1@list.ru

²Технический колледж ТТУ имени акад. М. С. Осими,
Душанбе, Таджикистан

³Политехнический институт Технического университета
имени акад. М. С. Осими, Худжанд, Таджикистан

⁴Институт энергетики Таджикистана, Бохтар, Таджикистан

Аннотация. Приводятся модели для описания эффективной теплопроводности системы базовой жидкости и наночастицы с учетом упорядоченности молекулярного слоя в наножидкостях. Теоретическим методом получено влияние фактора упорядоченности слоя наночастиц на базовую жидкость. Для этого использована модель Максвелла и Дульнева.

Ключевые слова: эффективная теплопроводность, наножидкость, наночастицы, численные методы, модель Максвелла и модель Дульнева.

В настоящее время механизм переноса тепла в наножидкостях изучен достаточно. Мы перед собой поставили задачу представить ряд статей, посвященных данной проблематике и настоящая статья является второй. Надо отметить, что каждая из статей будет посвящена отдельным механизмам изменения теплопроводности наножидкостей, изучению роли образования упорядоченного молекулярного слоя в наножидкостях. Объяснению данного механизма посвящен ряд работ как зарубежного издания, так и дальнего зарубежья, т.е. в частности работы [1 – 7]. На границе раздела твердое тело (наночастицы) – базовая жидкость молекулы жидкости могут иметь большую упорядоченность, чем внутри объема жидкости. При этом, как в твердом кристаллическом теле, теплопроводность упорядоченного вещества может заметно возрастать [1]. В этом случае возможны несколько различных моделей вклада в теплоперенос [2, 3]. Отметим, что при этом важной оказывается роль граничного термического сопротивления (сопротивления Капицы, которое может уменьшить теплоперенос [4]. Такое явление наблюдалось [5] и при добавке наночастиц окиси железа (Fe_2O_3 , $d = 50$ нм) в гидразингидрат. Как видно из работы [5], добавка от 0,1 до 0,3% наночастиц окисей металлов при различных температурах ($T = 298 \dots 348$ К) и атмосферном давлении теплопроводность

уменьшается, а затем увеличивается. С ростом концентрации наночастиц в системе гидразингидрат + наночастицы окисей металлов их плотность увеличивается во всем интервале температур. Теплопроводность наножидкостей системы гидразингидрат при добавлении наночастиц окисей металлов до 0,1% уменьшаются, а затем по мере увеличения их концентрации теплопроводность растет. Аномальный спад теплопроводности, вероятно, связан с максимальной плотностью исследуемых объектов за счет упорядоченного молекулярного слоя, который приводит к увеличению плотности наножидкостей. В работе Ю и Чоя [13] предложена модифицированная модель Максвелла для учета специфического тонкого нанослоя между наночастицами и жидкостью, в рамках которой вместо теплопроводности частицы λ_p введена модифицированная теплопроводность с учетом этого слоя ($\lambda_p \rightarrow \lambda_p^G$):

$$\lambda_p^G = \frac{[2(1-\gamma) + (1+\beta)^3(1+2\gamma)\gamma]}{-(1-\gamma) + (1+\beta)^3(1+2\gamma)} \lambda_p, \quad (1)$$

где $\gamma = \frac{\lambda_G}{\lambda_p}$ (λ_G – теплопроводность твердого нанослоя); $\beta = \frac{G}{r}$ – отношение толщины nano слоя к радиусу наночастицы.

Тогда модифицированную модель Максвелла можно записать в следующем виде:

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{\lambda_p^G + 2\lambda_m + 2(\lambda_p^G - \lambda_m)(1-\beta)^3 \phi}{\lambda_p^G + 2\lambda_m - (\lambda_p^G - \lambda_m)(1-\beta)^3 \phi} \lambda_m. \quad (2)$$

Модель упорядоченных структур также использовали для расчета эффективной теплопроводности композиционных материалов [6], а также нами для расчета эффективной теплопроводности пористой гранулированной окиси алюминия, содержащей различное количество активных металлов в вакууме ($P = 1,07$ Па) и различных газовых средах (N_2 , Ar, He, $P = 0,101$ МПа) в интервале температур (293...1073) К использована данная модель [7 – 12].

Из модели (2) следует, что вокруг наночастицы должен существовать очень тонкий (менее 10 нм) слой, который при добавлении более мелких наночастиц гораздо существеннее влияет на теплопроводность, чем увеличение доли нанофазы.

В работе [14] развита также модель, обобщающая модель Гамильтона–Кроссера с учетом нанослоя вокруг несферической наночастицы, которая дает соотношение:

$$\lambda_{\text{eff}} = \left(1 + \frac{m_{\text{eff}A}}{1 - m_{\text{eff}A}} \right) \lambda_m, \quad (3)$$

где $A = \frac{1}{3} \sum_{i=f, b, c} [(\lambda_{pi} - \lambda_m) / (\lambda_{pi} - (n-1)\lambda_m)]$; a, b, c – оси эллипсоида; $\varphi_{\text{eff}} = \varphi \sqrt{(a^2 + \xi)(b^2 + \xi)(c^2 + \xi)} / \sqrt{abc}$ – эффективная концентрация сложных эллипсоидальных частиц в базовой жидкости ($a \geq b \geq c$), содержащих нанослой. Если ввести эмпирический форм-фактор $n = \varphi^{-\alpha}$ (α – эмпирический параметр), модифицированную модель Гамильтона–Кроссера можно использовать для вычисления эффективной теплопроводности наножидкостей на основе углеродных нанотрубок (УНТ) и масла. Соискатели М. М. Гуломов [14] экспериментально исследовали теплопроводность наножидкостей на основе УНТ + жидкий диэтиловый эфир и УНТ + антифриз при различных температурах и давлениях, где концентрация УНТ изменялась в интервале 0,1...0,5% по массе. Вместе с тем подобное соотношение не может описать теплопроводность наножидкостей, содержащих оксидные и металлические наночастицы.

Список литературы

1. Mechanisms of heat flow in suspensions of nano sized particles (nano-fluids) / P. Keblinski, S. Philipot, S. Choi et al. // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 45.2005. – P. 855 – 863.
2. Keblinski, P. Comment on “Model for Heat Conduction in Nano fluids” / P. Keblinski, D. Cahill // Physical Review Letters. – 95.209401.2005.
3. Keblinski, P. Nano fluids for enhanced thermal transport: understanding and controversy. Symposium 11 Nano scale Heat Transport-From Fundamentals to Devices / P. Keblinski // Materials Research Society Spring Symposium, 10 – 13 April, 2007. – San Francisco, USA, 2007.
4. Дмитриев, А. С. Введение в нанотеплофизику / А. С. Дмитриев. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. – 790 с.
5. Зарипова, М. А. Влияние наночастиц на изменение теплофизических, термодинамических свойств некоторых кислородосодержащих, азотсодержащих органических жидкостей при различных температурах и давлениях: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / М. А. Зарипова. – Казань, 2016. – 43 с.
6. Дульнев, Г. Н. Теплопроводность композиционных материалов / Г. Н. Дульнев, Ю. П. Заричняк. – 1974. – 264 с.
7. Теплопроводность окиси алюминия в зависимости от концентрации кобальта и температуры в различных средах / Г. Н. Дульнев, Б. Л. Муратова, Т. В. Требель, Х. Маджидов, М. М. Сафаров // ТВТ. – 1987. – Т. 25, № 4. – С. 684 – 688.
8. Method of calculating the thermal conductivity of porous granular materials with metal filler in different media / G. N. Dulnev, B. L. Muratova, T. V. Tri-

bel, H. Madjidov, M. M. Safarov // Journal of Engineering and Thermo physics. – 1987. – Т. 51, N 2. – С. 940 – 943.

9. Сафаров, М. М. Теплофизические свойства окиси алюминия с металлическими наполнителями в различных газовых средах: дис. ... канд. техн. наук // М. М. Сафаров. – Душанбе, 1986. – 198 с.

10. Маджидов, Х. Эффективная теплопроводность окиси алюминия с металлическими наполнителями в различных газовых средах и вакууме / Х. Маджидов, М. М. Сафаров, С. Зубайдов // ИФЖ. – 1986. – Т. 50, № 3. – С. 465 – 472.

11. Madjidov, H. Effective thermal conductivity of aluminum oxide with metallic filler in gaseous medio and a vacuum at various temperature / H. Madjidov, M. V. Safarov // Journal of Engineering Physics and Thermophisecs. – 1986. – V. 50, N 3. – P. 465 – 469.

12. Маджидов, Х. Метод расчета эффективной теплопроводности смесей заметно отличающимися величинами теплопроводности компонентов / Х. Маджидов, М. М. Сафаров, С. Зубайдов // ДАН Тадж. ССР. – 1987. – № 5. – С. 297 – 300.

13. Review and Comparison of Nano fluid Thermal Conductivity and Heat Transfer Enhancements / W. Yu, J. Routbort et al. // Heat Transfer Engineering. – 2915. – 432-460.2008.

14. Гуломов, М. М. Влияние углеродных нанотрубок на изменение тепло-, температуропроводности и плотности жидкого диэтилового эфира: дис. ... канд. техн. наук / М. М. Гуломов. – Казань, 2017. – 132 с.

MODELS FOR DESCRIBING THE THERMAL CONDUCTIVITY OF NANOFUIDS

**S. H. Mirzoev¹, M. M. Safarov¹, M. M. Gulomov², M. M. Holikov³,
D. S. Hakimov⁴, S. S. Rafiev⁴, A. R. Radzhabov⁴, G. N. Neamatov⁴**

¹*Branch of Moscow State University named after M. V. Lomonosov,
Dushanbe, Tajikistan
mahmad1@list.ru*

²*Technical College of the TTU named after Acad. M. S. Osimi,
Dushanbe, Tajikistan*

³*Politechnical Institute of the Technical University
named after Acad. M. S. Osimi, Khujand, Tajikistan*

⁴*Institute of Energy of Tajikistan, Bokhtar, Tajikistan*

Abstract. In this paper, we present models for describing the effective thermal conductivity of a base fluid system and a nanoparticle, taking into account the ordering of the molecular layer in nanofluids. The influence of the factor of ordering of the nanoparticle layer on the base liquid is obtained theoretically. For this, the Maxwell and Dulnev model is used.

Keywords: effective thermal conductivity, nanofluid, nanoparticles, numerical methods, the Maxwell model, and the Dulnev model.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТОВ НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА

Н. Я. Ников, Т. Л. Жекова, М. Д. Данева

*Технический университет – Варна
Болгария, Варна, ул. Студентска, д. 1*

Аннотация. Показано, что электромагнитное излучение бытовой техники оказывает влияние на здоровье человека и способствует снижению производительности труда. Исследования проведены с помощью методов радиэстезирования с учетом принципов Л. Тюрена.

Ключевые слова: электромагнитный, электронный смог, радиоизмерение, радиэстезия, биорезонанс.

Повышение уровня здоровья человека является одним из основных факторов, способствующих развитию экономики любого государства. Это обусловлено снижением затрат на лечение и повышением производительности труда. В современных условиях все большую актуальность приобретают исследования влияния электромагнитных воздействий на организм человека.

Живые организмы в процессе эволюции адаптируются к определенному уровню электромагнитного воздействия, но резкое значительное увеличение уровня электромагнитных эффектов и последствия влияния стресса на адапционно-компенсаторные возможности организма в виде непрерывного действия этого фактора может привести к усталости, которые могут повлечь за собой его необратимые последствия в системе человека [1, 2].

Другие исследования показали, что люди подвержены риску возникновения нежелательных последствий генома и физиологических уровней в популяции облученных районов. Таким образом, при облучении человеческого организма можно ингибировать ряд областей генома лимфоцитов. Это может привести к различным аномалиям и, прежде всего, самой сложной системе иммунной защиты организма. Такой эффект приведет к трансляции определенных генов, чтобы нарушить синтез иммуноцитов, ответственных за продуцирование антител к определенному антигену. Через некоторое время после облучения иммунная система не сможет противодействовать инфекциям, вызванным антигеном, и даже обычный грипп будет смертельным [3].

Поскольку мутации, по большей части, вредны, ни один вид не может позволить себе быстрое накопление в половых клетках. Сохра-

нение вида требует, чтобы генитальные клетки организма были защищены от быстрых генетических изменений, но сохранение каждого человека требует защиты всех клеток организма. Ядерные изменения в соматических клетках могут способствовать естественному отбору в пользу тех клеток, которые лучше адаптируются к существующим условиям.

Это может привести к их неконтролируемому распространению, например, к развитию рака, который имеет более 20% преждевременной смерти в Западном полушарии. Исследования показали, что смертность людей в данном случае вызвана главным образом накоплением изменений в последовательности ДНК соматических клеток. 10-кратное увеличение частоты мутаций приведет к вероятному катастрофическому увеличению числа случаев рака [4].

Постоянное увеличение доказательств негативного воздействия электронного смога на здоровье человека заставляет авторов исследовать его физическое проявление в организме человека. Интересно влияние на некоторые недуги, заболевания и болезни, а также на возможность их предотвращения. Зная способ воздействия и изменения в человеческом теле, вызванные электронным смогом, авторский коллектив приходит к выводам, которые приводят к лечению некоторых последствий [5].

Многомерный организм человека состоит не только из физического тела. Помимо него, у каждого человека есть энергетические тела, не видимые для человеческого глаза. В прошлом говорилось, что человек, кроме видимого тела, имеет невидимую оболочку, которая не менее важна для тела. В числе важных энергетических параметров, которые указывают на состояние тела, есть аура и длина волны человека. Когда эти параметры нарушены, организм дебалансируется и наблюдается различная степень заболевания.

В своих работах Луи Тюрен с помощью научной физической биолокации доказывает, что длина волны человека является одним из наиболее важных показателей человеческого организма, с помощью которого можно контролировать общее состояние человека. Тюрен находит и доказывает, что длина волны здорового человека составляет 8 м. При внешних воздействиях, даже когда потребляется пища или вода с более низкой длиной волны, а также при длительном потреблении, это приводит к уменьшению волны человека, которая нарушает работу организма. Тюрен доказывает, что все болезни уменьшают длину волны человека [6].

Было показано, что одним из факторов, оказывающих значительное влияние на сокращение длины волны здорового человека, является современная техника (компьютеры, мобильные телефоны, холодильник), которую мы используем ежедневно в наших домах. Независимо от того, сколько электроприборов вокруг людей, техника работает на длине волны ниже длины волны человека. Исследовательская группа провела эксперимент, чтобы определить, каково их влияние и каково их физическое проявление в живом организме. Но основная цель этой статьи – продемонстрировать последствия влияния низковольтного и высоковольтного электронного смога, как это влияние воздействует на длину волны здорового человеческого организма.

По результатам обзора основных типов диагностики организма, выбрано физическое радиизмерение (радиэстезия) [7]. Были отобраны волонтеры с различным уровнем состояния здоровья для проведения экспериментов, которые знали о деталях того, что будет представлять исследование.

При анализе результатов людей, которые совершенно здоровы в соответствии с традиционной медициной, установлено, что даже здоровые люди иногда имеют эпизодические жалобы на боль в разных областях тела, чаще всего, в позвоночнике и голове. С помощью методов радиэстезирования и следования принципам Тюрена, было установлено, что длина волны человека составляет 7,85 м, с небольшим ощущением головной боли. У некоторых людей длина волны до 7,58 м, при сильных головных болях или болях в пояснице, груди или других частях тела, означает, что на организм оказывает, энергетическое воздействие. Впоследствии в их повседневной жизни был проведен анализ геопатогенного воздействия среды обитания и окружающих людей с диагностикой электроприборов. Результаты показывают, что одной из причин временного дискомфорта являются геопатогенные воздействия на рабочее место (например, стол и стул, который находятся в геопатогенной зоне). Все мы находимся в постоянном контакте с электроприборами и компьютерным оборудованием, а электроприборы имеют более низкие частоты волн, что помогает уменьшить длину волны.

Чтобы результаты были точными и ясными, а также для определения причины продолжающихся симптомов, после установления того, что в офисе и в доме нет никаких геопатогенных эффектов, люди строго наблюдаются в течение семи дней.

В первый день они работают и выполняют свою повседневную деятельность так же, как и в любой другой день. Во время наблюдения в 4 – 8 раз измерялась длина волны их тела. В конце дня было обнаружено, что значение длины волны тела не находится в диапазоне от 7,90 до 7,85 м. На второй день люди, которые собираются работать, останавливаются в течение 20 мин под соседними деревьями для отдыха, а затем находятся на своем рабочем месте, где производится первое измерение длины волны, и обнаруживается, что длина волны – 8 м. В течение следующих часов с частыми интервалами проводились измерения длины волны, которые сообщали о снижении с 7,95 до 7,90 м. Было обнаружено, что уменьшение длины волны связано с работой с окружающей техникой. Во время их полуденного перерыва, который составляет 30 мин, исследуемых просили остаться под соседними деревьями, а не оставаться в их офисе, как обычно. В конце перерыва было обнаружено, что их длина волны возросла до 8 м, а к концу рабочего дня их длина волны снова уменьшается. Это доказывает, что уменьшение связано с прямым контактом объектов с окружающим оборудованием и его излучением.

Однако измерения длины волны объектов следующих групп недостаточно для определения причин дискомфорта людей, а дальнейшие углубленные исследования проводятся с помощью устройства диагностики биорезонанса второго указанного типа, работающего по принципу электромагнитного излучения. Полученный диагноз является конкретным, подробным и точным, при этом различные заболевания, болезни и патогенные организмы регистрируются на биополе человека [8].

Список литературы

1. Пресман, А. С. Электромагнитные поля и живая природа / А. С. Пресман. – М., 1968.
2. Жекова, Т. Влияние фантомов на энергоинформационное поле человека. Фантом как феномен тонкого мира (spisane MABET) / Т. Жекова, Н. Ников. – Украина, 2017.
3. Мордачев, В. И. Оценка экологической опасности электромагнитного фона, создаваемого средствами мобильной радиосвязи / В. И. Мордачев. – Электросвязь, 2007.
4. Nikov, N., Zhekova T. Influence of the Newly Discovered Chemical Elements on the Human Organism Vital Functions and their Recovery Through Food,

Journal of Hygienic Engineering and Design / N. Nikov, T. Zhekova. – Ohrid, 2018.

5. Zhekova, T. The Phantoms in Food and their Effects on Human Health, Journal of Hygienic Engineering and Design / T. Zhekova, N. Nikov. – Ohrid, 2018.

6. Тюрэн, Л. Научна физикал на радиестезия / Л. Тюрэн. – София, 1998.

7. Пучко, Л. Радиестезично познание за човека. Т. III. Система за самодиагностика, самолечение и самопознание на човека / Л. Пучко. – София, 2009.

8. Кларк, Х. Лечение на всички болести / Х. Кларк. – София, 2008.

IMPACT OF ENERGY EFFECTS ON THE HUMAN BODY

N. Ya. Nikov, T. L. Zhekova, M. D. Daneva

*Technical University – Varna
Bulgaria, Varna, 1 Studentska st.*

Abstract. It is shown that electromagnetic radiation of household appliances has an impact on human health and contributes to a decrease in labor productivity. The studies were carried out with the help of the methods of radionuclide taking into account the principles of L. Türen.

Keywords: electromagnetic, electronic smog, radiomeasurement, radioesthesia, bioresonance.

**ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ, МАТЕРИАЛЫ, ТОПЛИВО И
НЕТРАДИЦИОННЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ
В МЕЖДУНАРОДНЫХ КОНКУРСАХ ТЕХНОЛОГИЙ,
СПОСОБСТВУЮЩИХ УСТОЙЧИВОМУ
РАЗВИТИЮ ЧЕЛОВЕЧЕСТВА**

С. М. Нобель¹, В. М. Тютюнник², Е. А. Иванков³

¹*Токийский институт технологий, Йокогама, Япония*

²*Международный Информационный Нобелевский Центр (МИНЦ),
Тамбов*

³*Непубличное акционерное общество «САЛЮС», Москва*

Аннотация. Для повышения конкурентоспособности России на приоритетных научно-технологических направлениях и преодоления несбалансированности сектора исследований и разработок фирма «САЛЮС», Международный Информационный Нобелевский Центр (МИНЦ) и семейство Нобелей учредили серии ежегодных международных наград «за технологические решения, способствующие устойчивому развитию человечества». Описаны условия конкурса, 10 технологических направлений, по которым вручается награда и в основе которых – технологии энергосбережения, производства новых материалов, топлива и нетрадиционных источников энергии.

Ключевые слова: международный конкурс технологий, устойчивое развитие человечества, энергосберегающие технологии, материалы, топливо, нетрадиционные источники энергии, Международный Информационный Нобелевский Центр (МИНЦ), фирма «САЛЮС».

Современная экономическая ситуация в мире требует опережающего развития отдельных специфичных направлений научных исследований и технологических разработок («чистая» энергетика, информационно-телекоммуникационные системы, персонифицированная медицина, новые технологии в сельском хозяйстве и т.д.), по многим из которых в нашей стране нет существенных результатов [1].

Основной проблемой, препятствующей достижению мирового уровня исследований и разработок, обеспечивающих конкурентоспособность Российской Федерации на приоритетных научно-технологических направлениях, является *несбалансированность сектора исследований и разработок и недостаточная проработанность механизмов его стратегического развития*, что в свою очередь порождает ряд проблем, требующих немедленного разрешения.

В связи с этим московская фирма «САЛЮС» в союзе с Международным Информационным Нобелевским Центром (МИНЦ) и другими научными, учебными и коммерческими предприятиями, а также с семейством Нобелей («Нобелевский траст устойчивости») учредили серии ежегодных международных наград «за технологические решения, способствующие устойчивому развитию человечества». Этот новый подход, основанный на синергии бизнеса и науки, позволит провести качественный отбор технологических решений, способствующих устойчивому развитию человечества, с изучением и объединением международных практик, для последующего внедрения номинированных технологий и их сопровождения вплоть до запуска в серийное производство и налаживания закупочно-сбытовых цепочек. Инфраструктуры компаний «САЛЮС» и МИНЦ позволяют реализовать эту задачу, а также ускорить трансфер научных технологий в международном масштабе с защитой прав интеллектуальной собственности.

Награда учреждается с 2018 г. Первое вручение состоится во втором квартале 2019 г. в Санкт-Петербурге (Россия). Последующие ежегодные вручения могут осуществляться в различных городах. Заявки на Награду 2019 года принимаются до 15 ноября 2018 г. В «Статутах» [2] подробно изложены требования к заявкам, 10 технологических направлений, по которым принимаются заявки, структура описания заявки и другие детали. Международный конкурсный отбор определит не ограничиваемое заранее количество победителей, которые получают Награды в виде дипломов и инвестиционных договоров. Сумма договора определяется с каждым победителем индивидуально. Общий инвестиционный бюджет для Награды составляет 50.000.000 долларов США.

Проекты могут быть представлены по следующим направлениям:

1. Натуральное и товарное хозяйство – технологии в сельском хозяйстве (земледелие, растениеводство, животноводство, садоводство и т.п.), лесном хозяйстве, рыбоводстве, промыслах, мелиорации и т.п.
2. Добыча и очистка воды – технологии очистки природной воды, насосное и трубопроводное оборудование, технологии опреснения, получения чистой питьевой воды, анализа качества воды и т.п.
3. Охрана природы и экологической среды человека – технологии воздуха и окружающей среды, мониторинга биосферы и техносферы, определения загрязнений и борьбы с ними, защиты воздуха и окружающей среды, утилизации мусора и твердых бытовых отходов и т.п.

4. Чистая промышленность – технологии экологически чистого производства, предотвращения загрязнений окружающей среды, технологии замкнутых производственных циклов, сокращения выбросов и сбросов загрязняющих окружающую среду отходов производства, сокращения ресурсоемкости и землеемкости производств, снижения риска для здоровья персонала, улучшения условий труда и т.п.

5. Транспорт и транспортировка – технологии перемещения и хранения сырья, продуктов производства и грузов, повышения безопасности и надежности железнодорожного, автомобильного, водного, воздушного, трубопроводного и общественного транспорта и т.п.

6. Возобновляемые альтернативные источники энергии – технологии использования энергии ветра, солнца, приливов и отливов, морских течений, биомассы и биогаза, геотермальной энергии, тепловой энергии океанов, водородной и т.п. энергетики.

7. Использование и потребление энергии – технологии повышения эффективности использования и потребления, накопления и хранения всех видов энергии, полученных любым способом.

8. Генная инженерия и биотехнология – технологии использования живых организмов (или их составных частей) в практических целях на базе достижений молекулярной биологии, технологии манипуляций с веществом наследственности и т.п.

9. Медицина и здравоохранение, физическая культура и спорт – лечебно-профилактические, санитарно-профилактические, аптечные, фармацевтические, физкультурные, спортивные и иные технологии и технические решения.

10. Социальная сфера и быт – технологии устойчивого развития социальной сферы общества и человека, быта личности и семьи, повышения благосостояния людей в жилищно-коммунальном хозяйстве, бытовом обслуживании, образовании, культуре, искусстве, туризме и отдыхе, розничной торговле, общественном питании и т.п.

Естественно, что в этом перечне основу составляют технологии энергосбережения, производства новых материалов, топлива и нетрадиционных источников энергии.

Список литературы

1. Указ Президента Российской Федерации от 7 июля 2011 г. № 899.
2. Статуты [Электронный ресурс]. – URL: <http://nobel-centre.com/ru/news/309-mezhdunarodnaya-nagrada-nao-salyus-i-mints>

**ENERGY-SAVING, MATERIALS, FUELS AND ALTERNATIVE
ENERGY SOURCES IN THE INTERNATIONAL COMPETITIONS
OF TECHNOLOGIES THAT PROMOTE
SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF MANKIND**

S. M. Nobel¹, V. M. Tyutyunnik², E. A. Ivankov³

¹*Tokyo Institute of Technology, Yokohama, Japan*

²*International Information Nobel Centre (IINC), Tambov*

³*Non-public Joint-stock Company “SALUS”, Moscow*

Abstract. In order to increase Russia's competitiveness in priority scientific and technological areas and to overcome the imbalance in the research and development sector, SALUS Company, the International Information Nobel Center (IINC) and the Nobel family have established a series of annual international awards “for technological solutions that contribute to the sustainable development of mankind”. The conditions of the competition, 10 technological areas in which the award is presented and which are based on energy saving technologies, the production of new materials, fuel and unconventional energy sources are described.

Keywords: international technology competition, sustainable human development, energy-saving technologies, materials, fuel, non-traditional energy sources, International Information Nobel Center (IINC), SALUS Company.

ТЕПЛОБМЕН И СОПРОТИВЛЕНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКОВ ГАЗОВ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ

Ю. Я. Печенегов

*ФГБОУ ВО «Энгельсский технологический институт (филиал)
Саратовского государственного технического университета
им. Гагарина Ю. А.», Энгельс
y.pechenegov@mail.ru*

Аннотация. На основании консервативных законов турбулентного пограничного слоя получены новые уравнения теплообмена и гидравлического сопротивления при турбулентном течении в каналах, имеющие структурные параметры для учета влияния переменности индивидуальных физических свойств газовых теплоносителей. Анализируется энергетическая эффективность теплообмена газовых теплоносителей при их нагреве и охлаждении.

Ключевые слова: турбулентное течение газов, теплообмен, гидравлическое сопротивление, переменные физические свойства, энергетическая эффективность.

В уравнениях подобия конвективного теплообмена и гидравлического сопротивления потоков физические свойства теплоносителей определяются при осредненной по длине течения температуре. Такой подход дает приемлемый по точности результат только при малых тепловых нагрузках и небольших изменениях температуры потока по его длине и в поперечных сечениях, когда влиянием переменности физических свойств теплоносителей на процессы переноса теплоты и импульса можно пренебречь. Изменение физических свойств с температурой наиболее значительно для газовых теплоносителей. Для них при высоких тепловых нагрузках учет влияния переменности физических свойств на процессы переноса обычно осуществляется путем введения в уравнения теплообмена и сопротивления поправок – множителей в виде отношения температуры стенки T_c к среднemasсовой температуре потока T_{cp} в той или иной степени. Поправки свои для ламинарных и турбулентных потоков зависят от условий течения и направления теплового потока. Обзор результатов работ разных авторов, изучавших влияние переменности физических свойств на теплообмен и сопротивление турбулентных потоков в каналах, приведенный в работе [1], указывает на значительные расхождения полученных данных и расчетных рекомендаций.

В работах [2 – 4] с использованием консервативных законов пограничного слоя получены новые уравнения теплообмена и сопротивления турбулентных потоков газовых теплоносителей в каналах, дающие возможность эффективно учитывать влияние переменности физических свойств индивидуальных газов при изменении их температуры в процессах нагрева или охлаждения.

Для теплообмена турбулентного потока в трубе получено [2]

$$\text{Nu} = \frac{q_c d}{(t_c - t_{cp}) \lambda_{cp}} = \left(2 + 2,6\sqrt{\xi}\right) \left(0,177 \text{RePr}_{cp} \text{Pr}_{cp}^{n-1} \sqrt{\xi}/C\right)^p \varepsilon_t, \quad (1)$$

где ε_t – параметр, учитывающий переменность физических свойств теплоносителя в сечении потока,

$$\varepsilon_t = \left[\left(\frac{\lambda_c}{\lambda_{cp}} \right)^{\frac{1}{p}-1} \left(\frac{\rho_c}{\rho_{cp}} \right)^{0,5} \frac{c_c}{c_{cp}} \right]^p, \quad (2)$$

$n = 0,35 + 0,058 \lg \text{Re}$; $C = 12,7$; $p = 1 - 1,2\sqrt{\xi}$; q_c – плотность теплового потока на стенке; d – диаметр трубы; t – температура; ξ – коэффициент гидравлического сопротивления трения; ρ – плотность; λ – коэффициент теплопроводности; c – теплоемкость; Re – число Рейнольдса; Nu – число Нуссельта; Pr – число Прандтля. Здесь и далее индексы: «с» – параметр при температуре стенки T_c ; «ср» – параметр при средней температуре потока T_{cp} .

Уравнение (1) в интервале $\text{Re} = 5 \cdot 10^3 \dots 10^6$ при $\varepsilon_t = 1$ хорошо согласуется с формулой Петухова–Кириллова

$$\text{Nu} = \text{RePr} (\xi/8) / \left(1 + 900/\text{Re} + 12,7\sqrt{\xi/8} (\text{Pr}^{2/3} - 1)\right), \quad (3)$$

которая считается наиболее универсальной и надежной среди известных формул, описывающих конвективный теплообмен при течении в каналах. Коэффициент сопротивления трения в выражении (3) для квазиизотермического потока определяется по формуле Филоненко

$$\xi = (1,82 \lg \text{Re} - 1,64)^{-2}. \quad (4)$$

Для газов зависимости физических свойств от температуры с хорошей точностью можно описать степенной функцией

$$A = A_0 (T/T_0)^{m_A}, \quad (5)$$

где A_0 и m_A – постоянные, свои для каждого свойства A ; $T_0 = 273$ К.

С учетом выражения (5) уравнение (2) примет вид

$$\varepsilon_t = (T_c/T_{cp})^m, \quad (6)$$

где $m = m_\lambda - p(m_\lambda - m_c + 0,5)$; m_λ и m_c – показатели степени в зависимостях (5) для коэффициента теплопроводности и теплоемкости соответственно. Для плотности газов показатель степени в выражении (5) равен единице.

Для коэффициента гидравлического сопротивления трения получено [3]

$$\xi = (0,3\text{Re}^{-0,25} + 4,2 \cdot 10^{-4} \text{Re}^{0,12}) \varepsilon_\xi. \quad (7)$$

Здесь поправка, учитывающая переменность свойств теплоносителя:

$$\varepsilon_\xi = (T_c/T_{cp})^{0,25m_\mu - 0,75}, \quad (8)$$

где m_μ – показатель степени в уравнении (5) для динамического коэффициента вязкости μ .

По своему физическому содержанию $\varepsilon_\xi = \xi/\xi_0$, где ξ – коэффициент гидравлического сопротивления неизотермического потока, а ξ_0 – то же для изотермического потока при тех же числах Рейнольдса.

Результаты расчетов по полученным уравнениям (1) и (7) находятся в хорошем соответствии с надежными экспериментальными данными разных авторов, а для квазиизотермических потоков – с формулами (3) и (4). Анализ расчетных результатов показывает, что учитывать влияние переменности физических свойств на теплообмен и сопротивление для индивидуальных газовых теплоносителей только через температурный фактор T_c/T_{cp} , как это часто рекомендуется в литературе, недостаточно. Дополнительными параметрами, определяющими количественную и качественную стороны этого влияния, являются атомность газов, а в процессах теплообмена еще и число Рейнольдса.

Расчеты в целях определения энергетической эффективности теплообмена турбулентных потоков газов различной атомности при течении в трубе проводились для условий $T_{cp} = \text{const}$ и $T_c = \text{var}$. Вычислялся относительный коэффициент энергетической эффективности теплообмена [5]

$$\tilde{E} = \frac{\alpha/\alpha_0}{\xi/\xi_0}, \quad (9)$$

где α – коэффициент теплоотдачи; α_0 и ξ_0 соответствуют квази-изотермическим условиям теплообмена ($T_c \cong T_{cp}$).

Учитывая, что $\varepsilon_t = \alpha/\alpha_0$, в соответствии с выражением (6) запишем

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = \left(\frac{T_c}{T_{cp}} \right)^{m_\lambda - p(m_\mu + 0,5)}. \quad (10)$$

Множитель p в показателе степени уравнения (10) определен выражением

$$p = 1 - 0,5 \text{Re}^{-0,1} \sqrt{\xi/\xi_0}. \quad (11)$$

Рассматривая совместно уравнения (9), (10) и (8), получим

$$\tilde{E} = (T_c/T_{cp})^b, \quad (12)$$

где показатель степени

$$b = m_\lambda - 1,25m_\mu + 0,25 + 0,5(m_\mu + 0,5) \text{Re}^{-0,1} (T_c/T_{cp})^{0,125m_\mu - 0,375}.$$

Результаты расчетов \tilde{E} по уравнению (12) для газов разной атомности представлены на рис. 1 и 2.

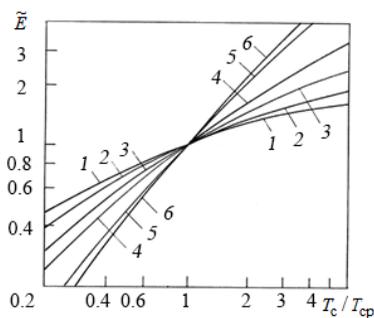


Рис. 1. Зависимости относительного коэффициента энергетической эффективности от температурного фактора:
 $\text{Re} = 10^4$; 1 – He – гелий; 2 – воздух; 3 – дымовой газ; 4 – NH_3 – аммиак; 5 – C_2H_6 – этан; 6 – C_5H_{12} – пентан

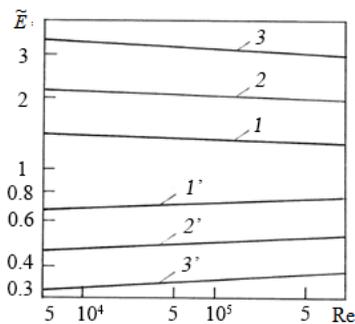


Рис. 2. Зависимости относительного коэффициента энергетической эффективности от числа Рейнольдса:
 1, 1' – He; 2, 2' – NH_3 ;
 3, 3' – C_5H_{12} ; 1, 2, 3 – $T_c/T_{cp} = 3$;
 1', 2', 3' – $T_c/T_{cp} = 0,4$

Из рисунка 1 следует, что при нагреве потока $\tilde{E} > 1$ и, наоборот, при охлаждении $\tilde{E} < 1$, с увеличением числа атомов в молекуле газа зависимости $\tilde{E} = f(T_c/T_{cp})$ на графике становятся более крутыми. Такой характер изменения \tilde{E} обусловлен тем, что с ростом температуры теплопроводность газов увеличивается с большей скоростью, чем вязкость, т.е. $m_\lambda > m_\mu$. С увеличением атомности газов различие значений m_λ и m_μ возрастает.

Как видно из рис. 2, влияние числа Рейнольдса \tilde{E} слабое и оно качественно различно при нагревании и охлаждении газов. С ростом Re при нагреве потока \tilde{E} уменьшается, а при охлаждении, наоборот, уменьшается.

Список литературы

1. Деменок, С. Л. Теплообмен и гидравлическое сопротивление при турбулентном течении в каналах / С. Л. Деменок. – СПб.: Бюро hi Prom, 2010. – 132 с.
2. Печенегов, Ю. Я. Теплообмен при турбулентном течении в каналах потоков газов разной атомности с переменными физическими свойствами / Ю. Я. Печенегов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2017. – № 4. – С. 8 – 11.
3. Печенегов, Ю. Я. Гидравлическое сопротивление при течении в трубах неизотермических турбулентных потоков газа и жидкости / Ю. Я. Печенегов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2017. – № 5. – С. 23 – 26.
4. Pechenegov, Y. Y. The heat exchange of different atomicity gases at high thermal loads / Y. Y. Pechenegov // Journal of Physics: Conf. Series 891 (2017) 012040.
5. Гортышов, Ю. Ф. Теплогидравлический расчет и проектирование оборудования с интенсифицированным теплообменом / Ю. Ф. Гортышов, В. В. Олимпиев, Б. Е. Байгалиев. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2004. – 432 с.

HEAT EXCHANGE AND RESISTANCE OF TURBULENT FLOWS OF GASES AT VARIABLE PHYSICAL PROPERTIES

Yu. Ya. Pechenegov

*FGBOOU WAUGH “Engelssky Institute of Technology (branch) of the Saratov State Technical University of Gagarin Yu. A.”, Engels
y.pechenegov@mail.ru*

Abstract. On the basis of conservative laws of a turbulent boundary layer the new equations of the heat exchange and hydraulic resistance at a sinuous flow in channels having structural parameters for taking note of variability of individual physical properties of gas heat carriers are received. The power effectiveness of the heat exchange of gas heat carriers at their heating and cooling is analyzed.

Keywords: sinuous flow of gases, heat exchange, hydraulic resistance, variable physical properties, power efficiency.

ДВОЙНАЯ ДИФFUЗИЯ «ВЧЕРА, СЕГОДНЯ И ЗАВТРА»

И. В. Поярков

Московский авиационный институт

(национальный исследовательский университет) МАИ, Москва

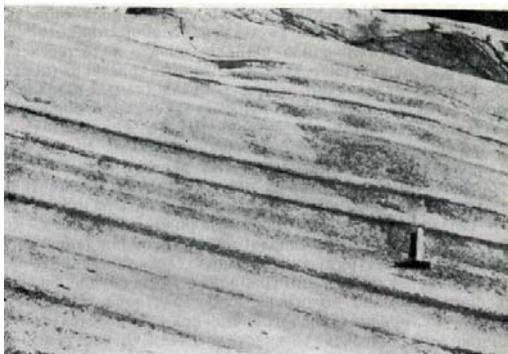
Аннотация. При океанографических исследованиях был открыт сложный массоперенос в многокомпонентных жидкостях, названный позднее двойной диффузией. Экспериментальные и модельные исследования этого явления позволили не только раскрыть его физические особенности, описать с помощью физических законов, но и применить в современном производстве.

Ключевые слова: двойная диффузия, гравитационная конвекция, массоперенос, многокомпонентная система.

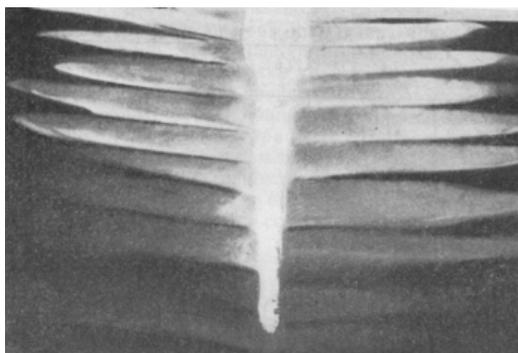
Явление, получившее название «конвекция с двойной диффузией» («double diffusive convection»), или «двойная диффузия», было обнаружено Х. Стоммелом, А. Аронсом и Д. Вланхаррдом [1] при океанографических исследованиях с теплопроводящей трубкой в середине 1950-х гг. Впоследствии экспериментально подтверждено М. Стерном [2], который показал, что стенки трубки играют вспомогательную роль, так как в жидкости соль диффундирует гораздо медленнее, чем распространяется тепло. Такой тепломассоперенос приводит к образованию длинных узких конвективных ячеек, называемых солевыми пальцами.

Аналогичные наблюдения были отмечены и другими учеными. Особый интерес представляет случай, наблюдаемый при вулканической активности, происходящей на дне океана. При вытекании непосредственно у дна океана очень горячей и соленой жидкости в холодную воду наблюдается разделение этого потока на две части. Первая поднимается вверх, она горячая и менее соленая, вторая стелется по дну с резко выраженной границей раздела морская вода и теплая, концентрированная струя. Со временем происходит кристаллизация и осаждение получившегося состава на дно океана, имеющие горизонтальную протяженность на много километров. На рисунке 1, а приведен срез такого процесса [3].

Также хотелось отметить серию экспериментов, описанных Н. Нуппером и Дж. Турнером при таяния айсбергов под действием солнечного излучения [4]. Вода, образующаяся при таянии, растекается по ряду слабонаклоненных конвективных слоев, образующихся по всей толщине вертикальной границы тающего льда, вместо того, чтобы



a)



б)

Рис. 1. Слои различной плотности вулканической интрузии (*a*) и слои при таянии куска льда под действием солнца в среде с градиентом плотности (*б*)

подниматься конвекцией прямо к поверхности и скапливаться наверху, как это было бы в случае нестратифицированной окружающей жидкости (рис. 1, *б*).

Миллером И. и Мэйсоном Е. при исследовании термоэффекта в трехкомпонентных газовых смесях была обнаружена неустойчивость в диффузионном процессе [5]. В диффузионном аппарате Лошмидта наблюдалось нерегулярное изменение температуры вблизи границы раздела газовых смесей, хотя изначально предполагалось ее монотонное изменение.

Начиная с середины 60-х годов прошлого века, под руководством профессора Н. Д. Косова сотрудники проблемной лаборатории тепло-

обмена и горения КазГУ им. С. М. Кирова приступили к исследованиям диффузионного процесса в многокомпонентных газовых смесях. Цель работы состояла в изучении физики процесса многокомпонентного массопереноса и эффектов, сопутствующих ему, проведении непосредственных измерений и разработке методов описания опытных данных. Были проведены экспериментальные исследования с водными растворами соли и сахара. В прозрачной плоской кювете менее плотная бинарная смесь соль-сахар располагалась над водным раствором соли. Система гравитационно устойчива, должен наблюдаться устойчивый диффузионный процесс (рис. 2) [6]. Но это не так, уже через 5 с наблюдаются тонкие нитевидные структуры, опускающиеся вниз, которые образовались не у стенки сосуда, а на границе раздела жидкостей, что можно интерпретировать как слабое конвективное течение. С увеличением продолжительности опыта происходит увеличение числа нитевидных структур, их взаимное взаимодействие и независимое перемещение ко дну кюветы, т.е. происходит развитие конвективного массопереноса.

Дальнейшие многочисленные экспериментальные исследования в основном проводились в газовых смесях различными методами. Эти опыты показали сложный массоперенос с образованием и перемещением структур разной плотности (рис. 3).

Описание опытных данных проводилось на основе уравнения состояния и уравнений гидродинамики, определяющего движение газовой смеси, находящейся в поле сил тяжести [8], например для бинарной:

$$\rho \left[\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + (\bar{u} \nabla) \bar{u} \right] = -\nabla p + \eta \Delta \bar{u} + \left(\frac{\eta}{3} + \xi \right) \nabla \operatorname{div} \bar{u} + \rho \bar{g};$$

$$\frac{\partial c_1}{\partial t} + \bar{v} \nabla c_1 = D_{12} \Delta c_1;$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\operatorname{div}(n \bar{v});$$

$$\bar{u} - \bar{v} = \alpha_p D_{12} \nabla c_1,$$

где $\alpha_p = \frac{m_2 - m_1}{c_1 m_1 + c_2 m_2}$; $\bar{u} = \frac{n_1 m_1 \bar{u}_1 + n_2 m_2 \bar{u}_2}{n_1 m_1 + n_2 m_2}$; $\bar{v} = \frac{n_1 \bar{u}_1 + n_2 \bar{u}_2}{n_1 + n_2}$; \bar{g} – уско-

рение свободного падения; p – давление; ρ – плотность; η , ξ – коэффициенты сдвиговой и объемной вязкости; \bar{u} , \bar{v} – среднemasсовая и среднечисловая скорости смеси.

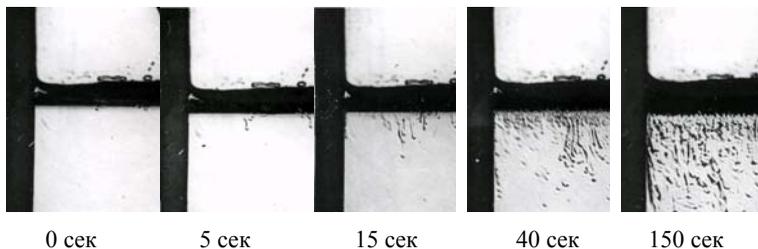


Рис. 2. Динамика неустойчивого диффузионного смешения в жидкостях

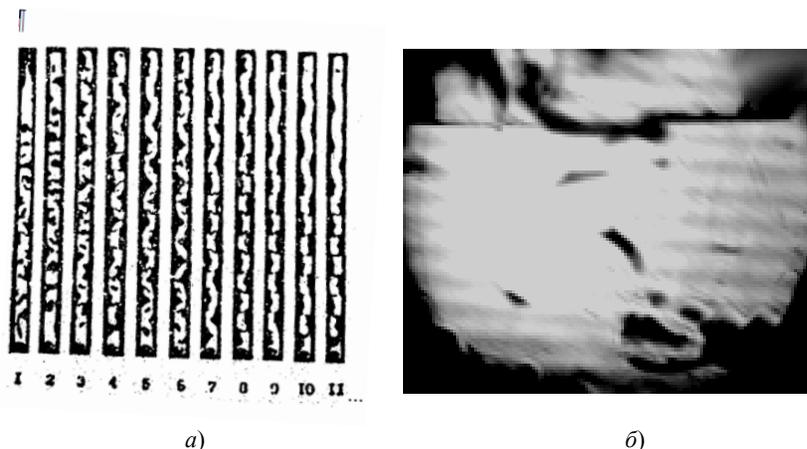


Рис. 3. Теневые снимки двойной диффузии в тройных газовых смесях в аппарате Лошмидта системы $N_2 - (He + Ar)$, $p = 3,0$ МПа [7] (а) и двухколбовом методе системы $(0,68 C_3H_8 + 0,32 CO_2) - N_2O$ при $p = 5,0$ МПа [6] (б)

Решая эту систему методом возмущений с использованием критериальных чисел Рэля и Прандтля, были теоретически показаны области молекулярного и конвективного массопереноса (рис. 4), границами которых являются линии монотонной (ММ) и колебательной (КК) неустойчивости, а также линия равной плотности ($\nabla\rho = 0$).

Как видно из рис. 4, на плоскости чисел Рэля можно выделить следующие области: область молекулярной диффузии, расположенную ниже линии равной плотности и колебательной неустойчивости – III; область, расположенную выше линии монотонной устойчивости – II, в которой наблюдается конвективный массоперенос; область, расположенную между линией колебательной и монотонной неустойчивости – I, которая характеризуется колебательной неустойчивостью

с одним затухающим и двумя растущими возмущениями. Конвективный процесс смешения также наблюдается в гравитационно устойчивой газовой системе – область, заключенная между линией равной плотности и колебательной неустойчивости – 2, и областью между линией равной плотности и монотонной устойчивости. На рисунке 4 эти области заштрихованы и соответствуют аномальной диффузии. В этих областях конвективный массоперенос вызывается двойной диффузией.

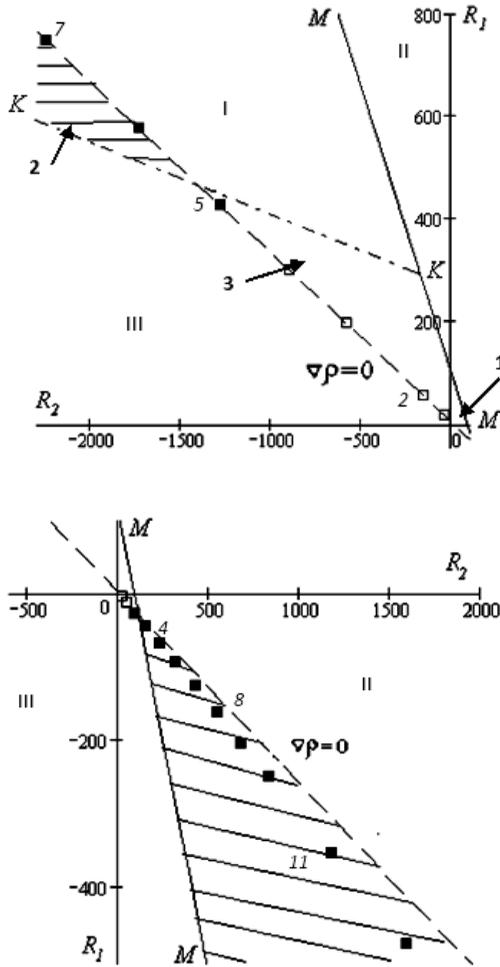


Рис. 4. Плоскость критерияльных чисел Рэлея для систем $N_2 - 0,333He + 0,667Ar$ [9] и $0,4163N_2 + 0,5837N_2O - N_2$ [10]

На плоскости чисел Рэлея можно отобразить экспериментальные данные. Если наблюдается диффузионный массоперенос точки, его отображающие не закрашенные, если осуществляется конвективное течение – закрашенные. Совместное расположение точек, отображающих экспериментальные результаты, линий колебательной, монотонной устойчивости и равной плотности показывает согласие между математической моделью и опытными данными. Это может говорить об адекватности математической модели двойной диффузии.

В настоящее время на основе двойной диффузии разрабатывается метод термо-диффузионно-гравитационного разделения газовых смесей, который можно применять для очистки газовых выбросов промышленных предприятий, глубокой переработки углеводородов в газообразном состоянии, разделения одно- и многофазных систем на компоненты с заданными свойствами [11]. Данное направление инновационное, так как связано с решением задач, снижающих экологическую нагрузку на окружающую среду при сокращении затрат на производственный процесс.

В заключение можно сказать, что между открытием явления двойной диффузии и его применением прошло сравнительно мало времени.

Список литературы

1. Stommel, H. An oceanographic curiosity: the perpetual salt fountain / H. Stommel, A. B. Arons, D. Blanchard // Deep-Sea Res. – 1956. – V. 3. – P. 152–153.
2. Stern, M. E. The “salt fountain” and thermohaline convection / M. E. Stern. – Tellus, 1960. – V. 12. – P. 172 – 175.
3. McBirney, A. R. Crystallization and layering of the Skaer-grard intrusion / A. R. McBirney, R. M. Noyes // J. Pet. – 1979. – V. 20. – P. 487 – 554.
4. Huppert, H. E. Ice blocks melting into a salinity gradient / H. E. Huppert, J. S. Turner // J. Fluid Mech. – 1980. – V. 100. – P. 367 – 384.
5. Miller, L. Oscillating instabilities in multicomponent diffusion / L. Miller, E. A. Mason // Phys. Fluids. – 1966. – V. 9, N 4. – P. 711 – 721.
6. Поярков, И. В. Диффузионная неустойчивость в бинарных и тройных газовых системах при наличии компонента с реальными свойствами : дис. ... д-ра физ.-мат. наук. по спец. 01.04.14 – теплофизика и теоретическая тепло-техника / И. В. Поярков. – Алма-Ата. – 2010. – 226 с.
7. Экспериментальные методы исследования диффузии и концентрационной гравитационной конвекции, вызванной неустойчивостью механического равновесия в многокомпонентных газовых смесях / Ю. И. Жаврин, В. Н. Косов, Д. У. Кульжанов, О. В. Федоренко. – Алматы: Издательский дом «Казак Университет», 2015. – 172 с.
8. Косов, В. Н. Аномальная диффузионная неустойчивость многокомпонентных изотермических газовых смесей / В. Н. Косов, В. Д. Селезнев. – Алматы–Екатеринбург, 1998. – 180 с.

9. Монотонная и колебательная неустойчивость механического равновесия изотермической трехкомпонентной газовой смеси с нулевым градиентом плотности / Ю. И. Жаврин, В. Н. Косов, Д. У. Кульжанов, К. К. Каратаева // Изв. МОН РК, НАН РК. Сер. физ.-мат. – 2000. – № 6. – С. 62 – 69.

10. Effect of the Pressure on the Type of mixing in a three-component Gas Mixture containing a Component Possessing the Properties of a Real Gas / Yu. I. Zhavrin, V. N. Kosov, D. U. Kulzhanov, K. K. Karataeva // Technical Physics Letters. – 2000. – V. 26, N 12. – P. 1108–1109.

11. Косов, В. Н. Численное моделирование возникновения конвективных течений при квазистационарном смешении в бинарных газовых смесях при различных углах наклона диффузионного канала / В. Н. Косов, С. А. Красиков, О. В. Федоренко // Вестник Московского государственного областного университета. Сер. Естественные науки. – 2018. – № 2. – С. 134 – 144.

DOUBLE DIFFUSIVE «YESTERDAY, TODAY AND TOMORROW»

I. V. Poyarkov

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow

Abstract. Complex mass transfer in multicomponent liquids was discovered in oceanographic studies and later it was called double diffusion. Experimental and model studies of this phenomenon have made it possible not only to disclose its physical features, to describe it with the help of physical laws but also to apply it in modern production.

Keywords: double diffusion, gravitational convection mass transfer, multicomponent system.

**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИКИ В СВС:
РАСЧЕТ АДИАБАТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЕНИЯ
ПРИ СИНТЕЗЕ НЕСТЕХИОМЕТРИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ
В СИСТЕМАХ Ti–B и Ti–C**

Б. Б. Хина

*Физико-технический институт НАН Беларуси
khina_brs@mail.ru*

Аннотация. Разработан новый метод термодинамического расчета адиабатической температуры горения при СВС нестехиометрических соединений в системах Ti–B и Ti–C, основанный на использовании CALPHAD-подхода. Одновременно выполняется расчет фрагмента диаграммы состояния на основе условия равенства химических потенциалов компонентов фаз, находящихся в равновесии при данной температуре, и адиабатической температуры СВС (T_{ad}) на основе условия баланса энтальпии. Рассчитанные зависимости T_{ad} от состава шихты позволяют судить о механизме взаимодействия в волне СВС.

Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), адиабатическая температура горения, термодинамический расчет, равновесная диаграмма состояния, CALPHAD-подход, модель регулярного раствора, модель Хиллерта–Стэффансона.

Самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) является эффективным методом получения большого числа соединений: карбидов, боридов, интерметаллидов и пр. Термодинамический расчет адиабатической температуры горения T_{ad} широко применяется для оценки возможности протекания СВС, конструирования реакторов и служит основой для создания математических моделей теплопереноса и процессов фазо- и структурообразования.

Для простого случая, когда в системе протекает одна экзотермическая реакция, величину T_{ad} можно оценить из условия баланса энтальпии в приближении полного превращения реагентов в продукты [1]. Для многокомпонентных систем значение T_{ad} одновременно с равновесным составом продуктов взаимодействия при T_{ad} рассчитывают по компьютерным программам ИСМАН-ТЕРМО [2], АСТРА-4 [3], Terra и др., которые основаны на минимизации энергии Гиббса системы и оснащены базой термодинамических данных неорганических веществ [4]. При этом все фазы рассматриваются как стехиометрические, состав которых описывается их химической формулой, например NiAl, TiC, TiB₂.

Вместе с тем большинство соединений, получаемых методом СВС, являются нестехиометрическими, и в пределах их области гомогенности энергия Гиббса G и энтальпия H изменяются существенно. Однако в вышеупомянутых подходах невозможно учесть влияние данного фактора на величину T_{ad} . В связи с этим целью работы является создание метода точного расчета величины T_{ad} и равновесного состава продуктов (расплава и твердого тугоплавкого соединения) для бинарных систем Ti–B и Ti–C на основе CALPAD-подхода (CALculation of PHase Diagrams – расчет диаграмм фазового равновесия) [5].

В CALPAD-подходе величины G и H бинарного расплава Ti–B, Ti–C в расчете на 1 моль описываются моделью регулярного раствора

$$\begin{aligned} G_l &= x_A G_A^l + x_{Ti} G_{Ti}^l + H_{ex}^l + RT(x_A \ln x_A + x_{Ti} \ln x_{Ti}), \\ H_l &= x_A H_A^l + x_{Ti} H_{Ti}^l + H_{ex}^l. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь G_i^l и H_i^l – энергия Гиббса и энтальпия i -го компонента в жидком состоянии, которые определяются по базе данных SGTE [6]; H_{ex}^l – избыточная энтальпия смешения, связанная с химическим взаимодействием атомов; x_i – атомная доля i -го компонента; R – газовая постоянная; A – неметалл (B или C).

Избыточная энтальпия смешения бинарного расплава Ti–A, $A \equiv B, C$ описывается полиномом Редлиха–Кистера–Муггиану [5–8]:

$$H_{ex}^l = x_A x_{Ti} L_{ATi}^l, \quad L_{ATi}^l = \sum_n^n L_{ATi}^l (x_A - x_{Ti})^n, \quad n \geq 0, \quad (2)$$

где L_{ATi}^l – параметр взаимодействия атомов в расплаве.

Термодинамические свойства фаз TiB₂, TiB и TiC, которые имеют область гомогенности и состоят из двух подрешеток, описываются моделью Хиллберта–Стэффансона [9], конкретный вид которой связан со структурой фазы.

Для фазы TiB₂ со структурной формулой $(Ti_{y'_{Ti}} B_{y'_B})_1 (B_{y''_B} Ti_{y''_{Ti}})_2$ [7], где y'_i и y''_i – доли атомов сорта i в первой (') и второй (") подрешетках ($i \equiv B, Ti$), имеем:

$$\begin{aligned} G_{TiB_2} &= G_{ref} + H_{ex} + RT[(y'_{Ti} \ln y'_{Ti} + y'_B \ln y'_B) + 2(y''_{Ti} \ln y''_{Ti} + y''_B \ln y''_B)], \\ H_{TiB_2} &= H_{ref} + H_{ex}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$G_{ref} = y'_{Ti} y''_B G_{Ti:B} + y'_B y''_{Ti} G_{B:Ti} + y'_{Ti} y''_{Ti} G_{Ti:Ti} + y'_B y''_B G_{B:B}, \quad (4)$$

$$H_{ref} = y'_{Ti} y''_B H_{Ti:B} + y'_B y''_{Ti} H_{B:Ti} + y'_{Ti} y''_{Ti} H_{Ti:Ti} + y'_B y''_B H_{B:B}, \quad (5)$$

$$H_{ex} = y'_{Ti} y'_B y''_B L_{Ti,B:B} + y'_{Ti} y'_B y''_{Ti} L_{Ti,B:Ti} + y'_{Ti} y''_B y''_{Ti} L_{Ti:B,Ti} + y'_B y''_B y''_{Ti} L_{B:B,Ti}. \quad (6)$$

Для фазы TiB используется структурная модель $(Ti)_1(B_{y_B} Ti_{y_{Ti}})_1$ [7]:

$$G_{TiB} = G_{ref} + H_{ex} + RT(y_B \ln y_B + y_{Ti} \ln y_{Ti}), \quad G_{ref} = y_B G_{Ti:B} + y_{Ti} G_{Ti:Ti}, \\ H_{TiB} = H_{ref} + H_{ex}, \quad H_{ex} = y_B y_{Ti}^0 L_{Ti:B,Ti}. \quad (7)$$

Фаза Ti_3B_4 рассматривается как стехиометрическое соединение.

Фаза TiC описывается структурной формулой $(Ti)_1(C_{y'_C}, Va_{y''_{Va}})_1$ [8], где Va – вакансии в подрешетке углерода, и ее параметры имеют вид:

$$G_{TiC} = G_{ref} + H_{ex} + RT(y''_C \ln y''_C + y''_{Va} \ln y''_{Va}), \quad H_{TiC} = H_{ref} + H_{ex}, \quad (8)$$

$$G_{ref} = y''_C G_{Ti:C} + y''_{Va} G_{Ti:Va}, \quad H_{ref} = y''_C H_{Ti:C} + y''_{Va} H_{Ti:Va}. \quad (9)$$

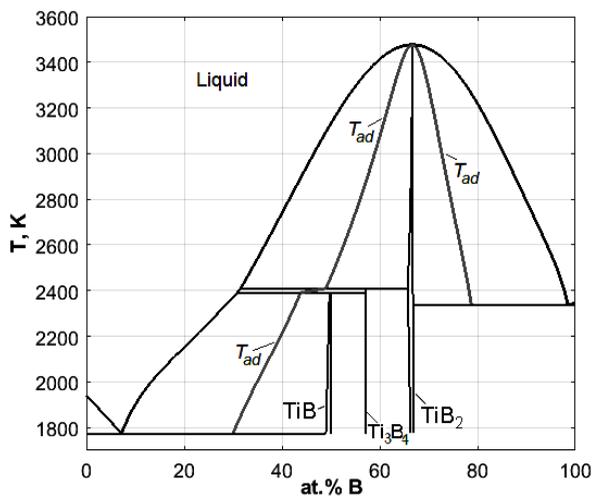
Энтальпийные параметры, входящие в формулы (3), (5), (7) – (9), определяются из соответствующих энергий Гиббса, которые приведены в работах по расчету диаграмм состояния Ti–B [7] и Ti–C [8], с помощью соотношения

$$H = G - T(\partial G / \partial T). \quad (10)$$

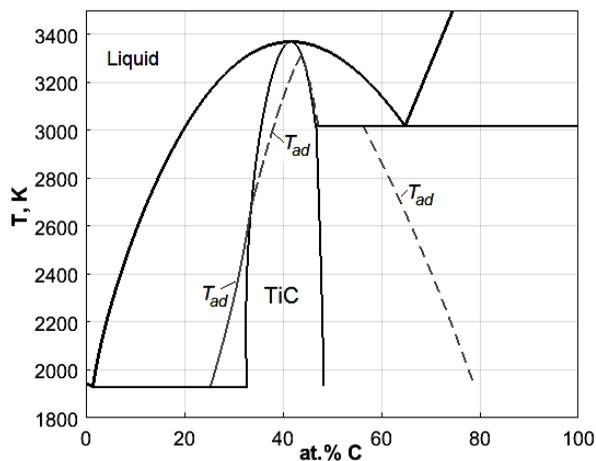
Значение T_{ad} определяется из условия баланса энтальпии:

$$x_A H_A(T_0) + (1 - x_A) H_{Ti}^{hcp}(T_0) = H_{pr}(x_A, T_{ad}), \quad A \equiv B, C. \quad (11)$$

Здесь x_A – исходный состав шихты, $T_0 = 298$ К – начальная температура, $H_{pr}(T_{ad})$ – энтальпия продуктов взаимодействия при T_{ad} . Конкретный вид выражения (11) зависит от того, в какую область бинарной диаграммы попадает точка с координатами $[x_A, T_{ad}]$. Поэтому для расчета величины $T_{ad}(x_A)$ необходимо одновременно выполнять расчет фрагмента диаграммы состояния, используя условие равенства химических потенциалов компонентов для соответствующей области диаграммы, и уточнять решение путем итераций.



a)



b)

Рис. 1. Рассчитанные фрагменты диаграмм состояния Ti-B (a) и Ti-C (б) и адиабатическая температура СВС T_{ad}

Результаты расчета T_{ad} в системах Ti-B и Ti-C для температур, в которых возможен СВС, т.е. выше точки плавления металлического реагента, приведены на рис. 1. При использовании CALPHAD-подхода

термодинамический расчет является физически строгим и позволяет учесть влияние нестехиометричности продуктов, т.е. избыточной энтальпии смешения, на величину T_{ad} .

На основании полученных кривых $T_{ad}(x_A)$ можно судить о механизме фазообразования в волне СВС. Известно, что взаимодействие в режиме СВС реализуется, когда T_{ad} превышает точку плавления металла или температуру эвтектики. В системе Ti–В значения T_{ad} при всех составах шихты находятся в двухфазной области между линиями ликвидус и солидус, так что твердый продукт может формироваться только путем кристаллизации бинарного расплава в волне СВС. В системе Ti–С в областях, где величина T_{ad} обозначена пунктирной линией, возможно чисто твердофазное взаимодействие с образованием карбида титана. Однако, как было показано ранее путем теоретических расчетов [10], такой механизм возможен лишь при малых размерах частиц реагентов.

Список литературы

1. Новиков, Н. П. Термодинамический анализ реакций самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / Н. П. Новиков, И. П. Боровинская, А. Г. Мержанов; под ред. А. Г. Мержанова // Проблемы горения в химической технологии и металлургии. – Черноголовка: ОИХФ, 1975. – С. 174 – 188.
2. Shiryayev, A. Thermodynamics of SHS processes: An advanced approach / A. Shiryayev // Int. J. SHS. – 1995. – V. 4. – P. 351 – 362.
3. Ватолин, Н. А. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах / Н. А. Ватолин, Г. К. Моисеев, Б. Г. Трусов. – М.: Металлургия, 1994.
4. Barin, I. Thermochemical Data of Pure Substances / I. Barin. – VCH Publishers, 1995.
5. Lukas, H. L. Computational Thermodynamics: The Calphad Method / H. L. Lukas, S. G. Fries, B. Sundman. – Cambridge University Press, 2007.
6. Dinsdale, A. T. SGTE data for pure elements / A. T. Dinsdale. – Calphad, 1991. – V. 15. – P. 317 – 425.
7. The Al-B-Nb-Ti system. I. Re-assessment of the constituent binary systems B-Nb and B-Ti on the basis of new experimental data / V. T. Witusiewicz, A. A. Bondar, U. Hecht, S. Rex, T. Ya. Velikanova. – J. Alloys Compounds, 2008. – V. 448. – P. 185 – 194.
8. Frisk, K. A revised thermodynamic description of the Ti-C system / K. Frisk. – Calphad, 2003. – V. 27. – P. 367 – 373.
9. Hillert, M. The regular solution model for stoichiometric phases and ionic melts / M. Hillert, L.-I. Staffansson. – Acta Chem. Scand., 1970. – V. 24. – P. 3618 – 3626.
10. Khina, B. B. Limits of applicability of the “diffusion-controlled product growth” kinetic approach to modeling SHS / B. B. Khina, B. Formanek, I. Solpan. – Physica B: Cond. Matter, 2005. – V. 355. – P. 14 – 31.

**APPLICATION OF THERMODYNAMICS IN SHS: CALCULATION
OF THE ADIABATIC COMBUSTION TEMPERATURE
AT THE SYNTHESIS OF NONSTOICHIOMETRIC COMPOUNDS
IN SYSTEMS Ti–B and Ti–C**

B. B. Khina

*Physico-technical Institute, National Academy of Sciences of Belarus
khina_brs@mail.ru*

Abstract. A new method for calculating the adiabatic combustion temperature during SHS of non-stoichiometric compounds in the Ti–B and Ti–C systems is developed basing on the use of CALPHAD approach. The method employs simultaneous calculation of a fragment of the phase diagram, which is based on the equality condition for the chemical potentials of components of the equilibrium phases at a given temperature, and the adiabatic temperature (T_{ad}) using the enthalpy balance condition. The calculated dependences of T_{ad} on the composition of initial charge permit us to judge about the interaction mechanisms in the SHS.

Keywords: self-propagating high-temperature synthesis (SHS), adiabatic combustion temperature, thermodynamic calculation, equilibrium phase diagram, CALPHAD approach, regular solution model, Hillert–Staffanson model.

О ПРИМЕНИМОСТИ МОДЕЛИ МИЕДЕМЫ К ОПИСАНИЮ ПАРЦИАЛЬНЫХ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОКОМПОНЕНТНОГО АМОРФНОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА

Б. Б. Хина¹, Г. Г. Горанский²

¹Физико-технический институт НАН Беларуси

²Научно-технологический парк «Политехник»,
Белорусский Национальный технический университет

Аннотация. С использованием полужемпирической модели Миедемы рассчитаны химический потенциал и парциальная молярная энтальпия железа (основы сплава) для аморфной фазы системы Fe–Si–B–Ni, полученной атриторной обработкой распыленного порошка. Показано, что модель Миедемы, которая применяется для расчета энтальпии аморфных фаз, некорректно оценивает их парциальные термодинамические характеристики.

Ключевые слова: аморфный сплав, модель Миедемы, избыточная энтропия смешения, химический потенциал, парциальная молярная энтальпия.

Аморфные сплавы обладают уникальными свойствами. Их получают путем быстрого охлаждения металлического расплава, а также методами механического легирования [1]. Ранее авторами на основе электрохимических исследований определены химический потенциал ($\mu_{Fe} = 190,41$ Дж/моль) и парциальная молярная энтальпия ($h_{Fe} = 15,807$ кДж/моль) железа (основы сплава) в аморфном сплаве Fe – 7,3% Si – 14,2% B – 8,26% Ni (% масс.), полученном распылением расплава и последующей атриторной обработкой (АО) [2]. Целью данной работы является сравнение полученных данных с теоретическими расчетами на основе комбинации модели Миедемы [3] с CALPHAD-подходом [4].

В CALPHAD-подходе [4] энергия Гиббса G_ϕ и энтальпия H_ϕ многокомпонентного неупорядоченного раствора ϕ определяются как

$$G_\phi = \sum_{i=1}^k x_i G_i^\phi + H_{ex} - TS_\phi, \quad H_\phi = \sum_{i=1}^k x_i H_i^\phi + H_{ex}, \quad (1)$$

где x_i – мольная доля i -го компонента; G_i^ϕ и H_i^ϕ – энергия Гиббса и энтальпия i -го компонента в фазовом состоянии ϕ (для аморфной фазы

($\varphi \equiv am$) принимают жидкое (l) состояние [5]; H_{ex} – избыточная энтальпия смешения; S_φ – энтропия.

В аморфных фазах наряду с идеальной энтропией смешения S_{id} существует избыточная S_σ [6], связанная с различием диаметров атомов d_i :

$$S_{am} = \sum_{i=1}^k x_i S_i^l + S_\sigma + S_{id}, \quad S_{id} = -R \sum_{i=1}^k x_i \ln x_i, \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} S_\sigma = R \left\{ 1,5(\zeta^2 - 1)y_1 + 1,5(\zeta - 1)^2 y_2 - [(\zeta - 1)(\zeta - 3)/2 + \ln \zeta](1 - y_3) \right\}, \\ y_1 = (1/\sigma_3) \sum_{j \geq i=1}^k (d_i + d_j)(d_i - d_j)^2 x_i x_j, \quad y_2 = (\sigma_2/\sigma_3^2) \sum_{j \geq i=1}^k d_i d_j (d_i - d_j)^2 x_i x_j, \\ y_3 = \sigma_2^3/\sigma_3^2, \quad \sigma_n = \sum_{i=1}^k x_i d_i^n, \quad i \neq j, \quad n = 2, 3, \quad \zeta = 1/(1 - \xi), \quad \xi = 0,64. \end{array} \right. \quad (3)$$

Модель Миедемы [7] описывает энтальпию ΔH_{chem} (в эВ) образования фазы из элементов; для аморфной фазы это избыточная энтальпия смешения:

$$\Delta H_{chem} \equiv H_{ex} = \sum_{j>i=1}^k x_i x_j (x_j^s \Delta H_{i in j}^{chem} + x_i^s \Delta H_{j in i}^{chem}) f_{ij}, \quad i \neq j, \quad (4)$$

$$f_{ij} = 1 + 5(x_i^s + x_j^s)^2, \quad x_i^s = x_i V_i^{2/3} / (x_i V_i^{2/3} + x_j V_j^{2/3}), \quad x_j^s = 1 - x_i^s, \quad (5)$$

$$\Delta H_{i in j}^{chem} = \frac{2P_{ij}V_i^{2/3}}{n_i^{-1/3} + n_j^{-1/3}} \left[-(\varphi_i^* - \varphi_j^*)^2 e + \frac{Q}{P_{ij}} (n_i^{1/3} - n_j^{1/3})^2 - \frac{R}{P_{ij}} \right]. \quad (6)$$

Здесь x_j^s – концентрация атомов i -го сорта на границе ячеек Вигнера–Зейца; $\Delta H_{i in j}^{chem}$ – энтальпия растворения i -го элемента в j -м; V_i – молярный объем i -го элемента, откорректированный с учетом типа решетки [7]; $e = 1$ – элементарный электрический заряд; φ_i^* и n_i – электроотрицательность и электронная плотность i -го компонента; P_{ij} и R/P_{ij} – коэффициенты, зависящие от природы пары i - j ; $Q/P_{ij} = 9,4$.

Значения параметров приведены в [7].

Парциальные термодинамические величины $z \equiv \mu_{Fe}, h_{Fe}, h_{Fe}^{(ex)}, S_{Fe}$, определяются из интегральных величин $Z \equiv G, H, H_{ex}, S_{\sigma}$ по соотношению

$$z_i = Z + \sum_{j=2}^k (\delta_{ij} - x_j) \frac{\partial Z}{\partial x_j}, \quad i = 1, \dots, k, \quad (7)$$

где δ_{ij} – символ Кронекера; индекс $i = 1$ относится к основе сплава (Fe).

Результаты расчетов μ_{Fe} и h_{Fe} приведены на рис. 1. Для сравнения показаны значения при комнатной температуре (298 К), определенные ранее [2] по данным экспериментальных измерений [exper.].

В результате установлено, что теоретические значения для аморфного сплава существенно отличаются от величин, определенных по экспериментальным данным. Это связано со структурой модели Миедемы. Кроме того, поскольку 100 %-но аморфный сплав был получен путем АО, то в экспериментальные величины μ_{Fe} и h_{Fe} входит запасенная энергия пластической деформации, приходящаяся на долю железа, которая в модели Миедемы не учитывается.

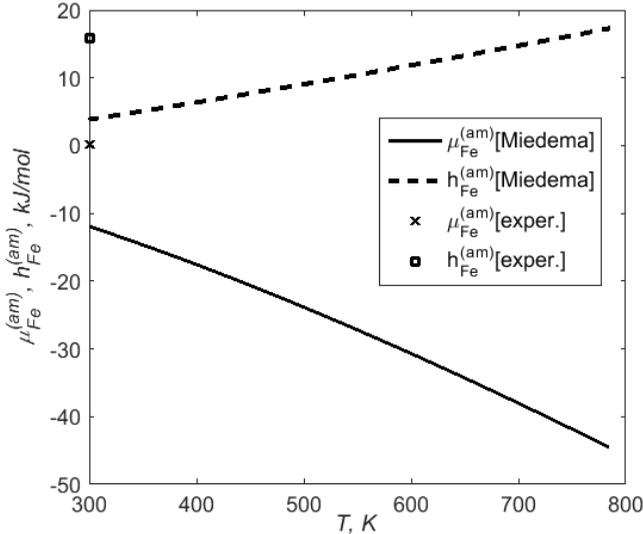


Рис. 1. Температурные зависимости химического потенциала и парциальной молярной энтальпии железа в аморфной фазе, рассчитанные по модели Миедемы

Список литературы

1. Suryanarayana, C. Bulk Metallic Glasses / C. Suryanarayana, A. Inoue // CRC Press, 2011.
2. B. B. Khina, G. G. Goranskiy. Advanced Mater. & Technol., 2016. – N 2. – P. 8 – 15.
3. L. J. Gallego, J. A. Somoza, J. A. Alonso. J. Phys. Cond. Matter, 1990. – V. 2. – P. 6245 – 6250.
4. H. L. Lukas, S. G. Fries, B. Sundman. Computational Thermodynamics: The Calphad Method. Cambridge University Press, 2007.
5. G. J. Van der Kolk, A. R. Miedema, A. K. Niessen. J. Less-Common Metals, 1988. – V. 145. – P. 1 – 17.
6. A. Takeuchi, A. Inoue. Mater. Trans. JIM, 2000. – V. 41. – P. 1372 – 1378.
7. A. R. Miedema, P. F. de Chatel, F. R. de Boer. Physica B, 1980. – V. 100. – P. 1 – 28.

ON THE APPLICABILITY OF THE MIEDEMA MODEL TO THE DESCRIPTION OF PARTIAL THERMODYNAMIC CHARACTERISTICS OF A MULTICOMPONENT IRON-BASE AMORPHOUS ALLOY

B. B. Khina¹, G. G. Goranskiy²

*¹Physico-technical Institute, National Academy of Sciences of Belarus
²Science and Technology Park “Polytechnic”,
Belorussian National Technical University*

Abstract. Using the Miedema model, the chemical potential and partial enthalpy of mixing of iron (the alloy base) in the amorphous phase in system Fe–Si–B–Ni, which was produced by attritor processing of atomized alloy powder, are calculated. It is demonstrated that the Miedema model, which is used for calculating the enthalpy of amorphous phases, incorrectly estimates their partial thermodynamic characteristics.

Keywords: amorphous alloy, Miedema model, excess entropy of mixing, chemical potential, partial molar enthalpy.

Секция
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА

УДК 66.097.6

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ
НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕТЕРОГЕННО-КАТАЛИТИЧЕСКОГО
ПРОЦЕССА

С. Н. Антонюк¹, Б. А. Арутюнов¹, В. Н. Торховский¹,
Е. З. Голосман², Е. А. Боевская², Д. В. Никишин¹

¹*ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет»,
Институт тонких химических технологий им. М. В. Ломоносова,
Москва*

antonjuk2006@yandex.ru

²*ООО «НИАП-Катализатор», Новомосковск*

Аннотация. Изучено влияние теплопроводности каталитических систем с повышенной теплопроводностью на активность и селективность процесса дегидрирования метанола с получением метилформиата.

Ключевые слова: каталитические системы, теплопроводность, метилформиат.

В ИТХТ им. М. В. Ломоносова совместно с ИОХ им. Н. Д. Зелинского РАН и ООО «НИАП-Катализатор» разработана технология комплексной переработки метанола с получением синтез-газа, его компонентов (H_2 , CO), диметилового эфира, а также метилформиата (МФ), необходимого для получения формамидов и муравьиной кислоты.

Большинство химических реакций протекают со значительным тепловым эффектом, поэтому важно обеспечивать эффективный подвод или отвод тепла в слой катализатора, так как возникающие градиенты температур влияют на эффективность и стабильность катализатора, поэтому актуальным является разработка каталитических систем с высокой теплопроводностью.

В качестве модельной реакции была выбрана реакция дегидрирования метанола в целях получения метилформиата, обладающая значительным эндотермическим эффектом – 50,1 кДж/моль. За основу каталитической системы был взят медь-цинк-алюмокальциевый про-

мышленный катализатор низкотемпературной конверсии монооксида углерода К-СО, активный в данном процессе.

Для увеличения теплопроводности каталитической системы половину объема катализатора замещали теплопроводящей добавкой, в качестве которой были взяты высокодисперсные порошки меди и цинка с теплопроводностью 6,12 и 1,56 Вт/(м·К) соответственно. Измерение теплопроводности образцов каталитических систем проводили с применением измерителя теплопроводности ИТ-λ-400. Показано, что введение порошка меди в каталитическую систему приводит к увеличению теплопроводности от 0,55 до 1,19 Вт/(м·К), а в случае добавки цинкового порошка – до 0,84 Вт/(м·К).

Эксперименты по дегидрированию метанола до метилформиата проводили в диапазоне температур 150...250 °С при объемной скорости подачи сырья 12 ч⁻¹ и в диапазоне объемных скоростей 1...12 ч⁻¹ при 225 °С.

Изучение активности и селективности каталитических систем в реакции дегидрирования метанола в целях получения метилформиата показало, что повышение теплопроводности до 1,19 Вт/(м·К) путем введения теплопроводящих добавок приводит к увеличению селективности по метилформиату на 20...30% в диапазоне температур 200...225 °С при снижении конверсии метанола на 10...15% (при 50% содержании катализатора в каталитической системе), что свидетельствует также о повышении активности катализатора. При этом выход по метилформиату возрастает от 8,3 до 14,2% при температуре 225 °С и объемной скорости подачи сырья 3 ч⁻¹. Производительность по метилформиату исследуемых систем может достигать 600 г_{МФ}/(л_{кат}·ч) при 225 °С и 9...12 ч⁻¹.

Список литературы

1. Антонюк, С. Н. Каталитические превращения метанола с целью получения метилформиата, диметилового эфира, монооксида углерода и водорода: дис. ... канд. техн. наук: 02.00.13 / Антонюк Сергей Николаевич. – М., 2005. – 168 с.
2. Катализаторы для процесса получения водородного топлива / М. А. Круглова, М. П. Ярошенко, С. Н. Антонюк, Е. З. Голосман // Вестник МИТХТ. – 2008. – Т. 3, № 6. – С. 22 – 26.
3. Дегидратация метанола на цирконийсодержащих алюмокальциевых катализаторах / М. А. Круглова, М. П. Ярошенко, С. Н. Антонюк, Е. З. Голосман // Катализ в промышленности. – 2008. – Т. 3, № 5. – С. 57 – 63.

4. Исследование каталитических свойств цирконий-алюмо-оксидных и цирконий-алюмокальциевых материалов в процессе дегидратации метанола / М. А. Круглова, М. П. Ярошенко, С. Н. Антонюк, Е. З. Голосман // Вестник МИТХТ. – 2010. – Т. 5, № 4. – С. 48 – 53.

STUDY OF THERMAL CONDUCTIVITY EFFECT ON THE EFFICIENCY OF HETEROGENEOUS CATALYTIC PROCESS

**S. N. Antonyuk¹, B. A. Arutyunov¹, V. N. Torkhovskiy¹,
E. Z. Golosman², E. A. Boevskaya², D. V. Nikishin**

*¹FGBE HE «MIREA – Russian Technological University»,
Institute of Fine Chemical Technologies named after M. V. Lomonosov,
Moscow*

antonyuk2006@yandex.ru

²LLC «NIAP-KATALIZATOR», Novomoskovsk

Abstract. We studied how the thermal conductivity of catalytic systems with high thermal conductivity influences activity and selectivity of methanol dehydrogenation process with methyl formate as a product.

Keywords: catalytic system, thermal conductivity, methyl formate.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ДВУХСЛОЙНОМ ПОЛИМЕРНО-МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ИЗДЕЛИИ

А. О. Богатырев, А. А. Львова, И. М. Никитин
*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный
технический университет», Тамбов
teplotehnika@nnn.tstu.ru*

Аннотация. Представлено распределение температуры в полимерно-металлическом изделии от действия нагревателя постоянной мощности в виде диска, действующего на плоской поверхности покрытия. Приведено решение краевой задачи нестационарного теплопереноса применительно к одномерному распространению тепла в плоском полупространстве при реализации регулярного режима для двухслойной системы.

Ключевые слова: двухслойное изделие, краевая задача, математическая модель, неразрушающий контроль, температурное поле, тепловой метод, теплопроводность, численный расчет.

Тепловые методы неразрушающего контроля (НК) позволяют определять теплофизические свойства (ТФС) твердых материалов по отклику на тепловое воздействие от нагревателя определенной формы [1]. В данной работе численно исследована возможность применения математической модели одномерного распространения тепла в полимерно-металлическом двухслойном изделии для определения ТФС (или толщины) материала полимерного покрытия при выполнении условия локальной регуляризации тепловых потоков от действия круглого плоского источника тепла постоянной мощности [2].

Согласно измерительной схеме метода на поверхности двухслойного тела располагают нагреватель постоянной мощности в виде тонкого диска, который встроен в подложку измерительного зонда (ИЗ). ТФС материала подложки ИЗ – λ_3, c_3, ρ_3 . Нагреватель подает в двухслойное тело тепловой поток q_1 . Первый слой тела (покрытие из пентапласта) имеет ТФС – λ_1, c_1, ρ_1 ; ТФС второго (из сплава алюминия) слоя – λ_2, c_2, ρ_2 . Толщины слоев: первого – h_1 , второго – h_2 .

Температура контактной поверхности подложки ИЗ в двух точках контроля измеряется с помощью термоэлектрических преобразователей, расположенных на оси нагревателя и на расстоянии l от оси.

Сформулирована краевая задача теплопроводности [2, 3]. Решение задачи (без учета теплоемкости нагревателя) имеет следующий вид:

$$T_1(0, \tau) = \frac{2q_1}{\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{\tau}}{\varepsilon_2} + \left(1 - \frac{\varepsilon_1^2}{\varepsilon_2^2}\right) \frac{q_1 h_1}{\lambda_1}.$$

Данное выражение представляет собой линейную зависимость вида

$$T_1(0, \tau) = b_1 \sqrt{\tau} + b_0,$$

где

$$b_1 = \frac{2q_1}{\sqrt{\pi}\varepsilon_2}.$$

Так как первый слой объекта низкотеплопроводный, а второй – высокотеплопроводный, т.е. $\lambda_1 \ll \lambda_2$, тогда $\varepsilon_1 \ll \varepsilon_2$.

Следовательно,

$$b_0 = \left(1 - \frac{\varepsilon_1^2}{\varepsilon_2^2}\right) \frac{q_1 h_1}{\lambda_1} \approx \frac{q_1 h_1}{\lambda_1} \quad \text{и} \quad h_1 = \frac{\lambda_1 b_0}{q_1}.$$

Зная теплопроводность материала полимерного покрытия λ_1 , можно определить h_1 . Если задана величина h_1 , можно определить λ_1 .

Исследование температурного поля в слое полимерного покрытия проводили численным моделированием по методу конечных элементов с помощью пакета программ Elcut Student [4]. Важны следующие аспекты применения предложенной математической модели распространения тепла в двухслойных объектах: начальное равномерное распределение температуры в объекте контроля; реализация одномерного распространения тепла в плоском полупространстве; наличие на термограмме температурно-временного участка, соответствующего локальной регуляризации тепловых потоков; соблюдение условия полуограниченности в тепловом отношении исследуемого объекта. Для графического представления и анализа полученных данных использовали пакет программ Microsoft Excel.

Визуализация температурных полей в покрытии из пентапласта показала, что в локальной области покрытия, расположенной вблизи оси нагревателя (около границы раздела с нагревателем), на протяжении некоторого времени реализуется одномерное распределение тепла в плоском полупространстве (рис. 1). Результаты получены при следующих условиях моделирования: $q = 4000 \text{ Вт/м}^2$; $R_n = 10 \text{ мм}$; время нагрева 60 с (a) и 300 с (b); $\Delta\tau = 1 \text{ с}$. Построены термограммы в точках контроля по толщине покрытия с координатой $Y = 0,01; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 0,9; 0,99 \text{ мм}$. Определены значения T_1/T_i и q_1/q_i в точках контроля

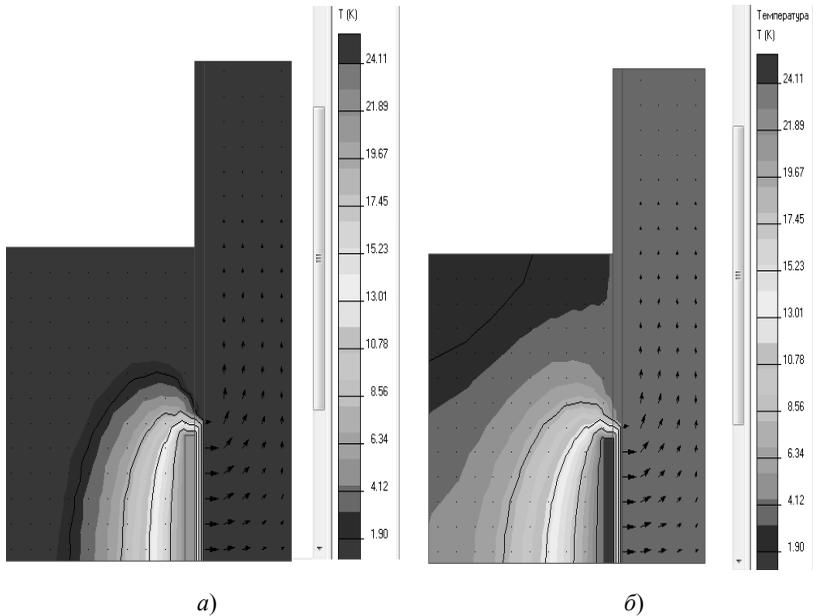


Рис. 1. Температурное поле в подложке ИЗ, покрытии из пентапласта, в пластине из сплава алюминия на моменты времени 60 (а) и 300 (б) секунд

во времени (рис. 2) в целях установления возможности реализации режима регуляризации тепловых потоков в исследуемой тепловой системе численным путем. Результаты исследования свидетельствуют о реализации данного режима на рабочем участке термограммы во временной области 20...30 с.

Таким образом, учтено, что регулярные тепловые режимы первого и второго рода имеют общее свойство, характеризующееся независимостью от времени отношения теплового потока в любой точке тела к потоку тепла на его поверхности. Данное свойство доказано А. В. Лыковым [5]. Применительно к НК следует говорить не о регулярном тепловом режиме для всего тела, а о регуляризации теплопереноса для локальной области тела.

Термический анализ проводят, основываясь на участке термограммы, соответствующем регуляризации теплопереноса в области нагревателя и термоприемника.

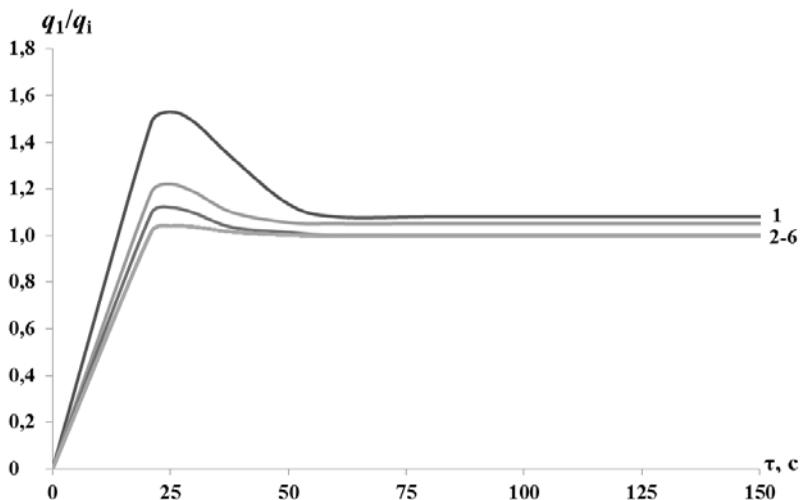


Рис. 2. Значения q_1/q_i в точках контроля во времени

Таким образом, рассматриваемый метод реализует определение ТФС материалов (или толщины) тонких полимерных покрытий на металлических основаниях с применением предложенной математической модели по рабочим участкам термограмм, соответствующим одномерному распространению тепла при соблюдении условия регуляризации тепловых потоков. Методика определения рабочих участков термограмм предусматривает применение статистических критериев.

Список литературы

1. Жуков, Н. П. Многомодельные методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий / Н. П. Жуков, Н. Ф. Майникова. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 288 с.
2. Моделирование теплопереноса в методе неразрушающего контроля двухслойных материалов / Н. П. Жуков, Н. Ф. Майникова, И. В. Рогов, А. О. Антонов // Вестник Тамбовского государственного технического университета, 2013. – Т. 19, № 3. – С. 506 – 511.
3. Майникова, Н. Ф. Моделирование теплопереноса применительно к неразрушающему контролю двухслойных объектов. В 2-х т. / Н. Ф. Майникова, В. Д. Попов, Д. В. Трофимов // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн: II Междунар. конф. – Тамбов: ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2016. – Т. 1, вып. 2. – С. 150 – 154.

4. ELCUT: Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.1. Руководство пользователя. – СПб.: Производственный кооператив ТОР, 2003. – 249 с.

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

THE STUDY OF TEMPERATURE FIELDS IN A TWO-LAYER POLYMER-METAL PRODUCT

A. O. Bogatyrev, A. A. Lvova, I. M. Nikitin

*Tambov State Technical University, Tambov
teplotehnika@nnn.tstu.ru*

Abstract. The temperature distribution in the polymer-metal state from the action of a constant power heater in the form of a disk acting on a flat surface of the coating is Presented. The solution of the boundary-value problem of non-stationary heat transfer in relation to one-dimensional heat propagation in a flat half-space is given for the realization of a regular regime for a two-layer system.

Keywords: two-layer product, the boundary value problem, the mathematical model, nondestructive testing, temperature field, thermal method, the thermal conductivity, and numeric computation.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ЗАМКНУТЫХ ВРАЩАЮЩИХСЯ КОНСТРУКЦИЯХ

В. В. Ветров, А. А. Воробьев

*ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», Тула
andreyv_v@yandex.ru*

Аннотация. На основе результатов физического и математического моделирования подтверждена гипотеза интенсификации процессов конвективного теплопереноса внутрь замкнутых воздушных полостей при их внешнем нагреве и осевом вращении относительно продольной оси симметрии. Показано, что численное моделирование процессов конвективного теплопереноса в замкнутых вращающихся полостях следует проводить в трехмерной постановке.

Ключевые слова: конвективный теплообмен, центробежное поле массовых сил, замкнутая воздушная полость, вращение, коэффициент конвекции.

Предметом данной лекции является обсуждение особенностей конвективного теплопереноса в замкнутых воздушных полостях различных конфигураций при доминировании центробежного поля массовых сил относительно гравитационного.

Ранее уже излагался этот вопрос в эмпирической постановке [1, 2]. При этом выдвинутая гипотеза об интенсификации теплопереноса воздушной прослойкой с ее внешней нагретой границы в условиях осевого вращения доказывалась экспериментально и теоретически.

Статистическая обработка экспериментальных данных по исследованию теплопереноса в гравитационном силовом поле для замкнутых полостей [3] дает зависимость вида

$$\varepsilon_k = c Ra^n, \quad (1)$$

где c и n – эмпирические коэффициенты; Ra – число Рэлея, определяемое зависимостью $Ra = g\beta\Delta T l^3 / (\nu a)$, здесь g – ускорение свободного падения, β , ν , a – коэффициенты объемного расширения, кинематической вязкости и температуропроводности среды, ΔT – радиальный перепад температур, l – определяющий размер.

При этом было показано, что для количественной оценки интенсивности теплообмена во вращающихся полостях можно воспользоваться эмпирической зависимостью (1) для коэффициента конвекции в замкнутых невращающихся полостях, заменив при этом ускорение силы тяжести на центробежное ускорение: $Ra_{\text{вр}} = \omega^2 r'_{\text{ср}} \beta \Delta T l^3 / (\nu a)$.

После этого коэффициент конвекции для вращающейся полости при $\omega^2 r'_{cp} \gg g$ определяется уточненной зависимостью

$$\varepsilon_{вр} = c (Ra_{вр})^n. \quad (2)$$

Авторами с учетом работы [4] предложена зависимость коэффициента конвекции от скорости осевого вращения замкнутых объемов сферической формы:

$$\varepsilon_{вр} = 0,228 (Ra_{вр})^{0,226}. \quad (3)$$

Выражение (3) хорошо аппроксимирует экспериментальные данные [1]. Аналогичные исследования проведены для цилиндрической полости на основе теплового блока специализированной экспериментальной установки (рис. 1) [5, 6].

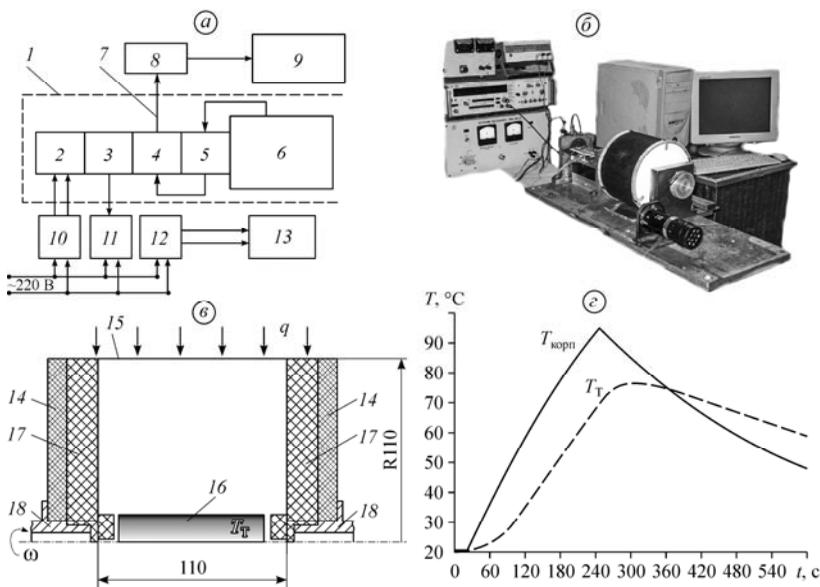


Рис. 1. Блок-схема (а), общий вид (б) экспериментальной установки с измерительным оборудованием; модель теплового блока, используемого в эксперименте (в), и режимы нагрева внешней цилиндрической обечайки и тепломера (2):

$T_{корп}$ – средняя температура корпуса теплового блока;
 $T_{Т}$ – средняя температура тепломера

В результате нагрева наружной поверхности цилиндрической обечайки теплового блока b и его вращения возникают внутренние конвективные течения, приводящие к интенсификации переноса тепла внутри теплового блока. Количество тепла, переданное в процессе теплообмена, аккумулируется тепломером $1b$ с известной теплоемкостью и определяется на основе данных об изменении его температуры по методике монотонного теплового режима. В целях уменьшения тепловой инерционности и повышения чувствительности к тепловому воздействию тепломер выполнен в виде тонкостенного пустотелого медного цилиндра. Перед началом регистрации данных тепловой блок раскручивали до заданной скорости осевого вращения. Момент времени начала регистрации данных принят за начальный момент времени (0 с). Внешний нагрев (рабочая зона эксперимента) начинался с момента времени 20 с после установления поля скоростей вращения воздушной среды в полости и продолжался в течение 300 с. Эксперименты проводили для следующих скоростных режимов вращения теплового блока: 0,5; 2,5; 5; 10; 15; 20 и 30 об/с.

В результате критерийной обработки экспериментальных данных получена новая зависимость для коэффициента конвекции от скорости осевого вращения замкнутых осесимметричных объемов цилиндрической формы:

$$\varepsilon_{\text{вп}} = 0,085 \left(\text{Ra}_{\text{вп}} \right)^{0,3}. \quad (4)$$

Для детального исследования рассматриваемых явлений в полостях различных конфигураций целесообразно использование методов математического моделирования на основе современных программных продуктов.

В этом случае тепломассоперенос в текучей среде моделируется современными программными продуктами с помощью уравнений Навье–Стокса, описывающих нестационарные законы сохранения массы, импульса и энергии. При этом дополнительно используют уравнения состояния воздушной среды, а также эмпирические зависимости для ее коэффициентов вязкости и теплопроводности от температуры. Для моделирования турбулентных течений уравнения Навье–Стокса осредняются по Рейнольдсу, а крупномасштабные временные изменения осредненных по малому масштабу времени газодинамических параметров потока (давления, скоростей, температуры) учитываются введением соответствующих производных по времени. Для замыкания системы уравнений используют уравнения переноса кинетической энергии турбулентности и ее диссипации в рамках выбранной модели турбулентности.

Для проверки адекватности используемых при компьютерном моделировании математических моделей выполнено сравнение численного решения с данными физического эксперимента, проведенного на основе экспериментальной установки, представленной на рис. 1, при указанном режиме нагрева.

При постановке задачи математического моделирования в качестве граничных условий использовались граничные условия первого рода. Оценку достоверности результатов численного моделирования проводили сравнением показаний, полученных в ходе физического эксперимента для термопары, расположенной на тепломере, с рассчитанными значениями. Параметры расчетных сеток и временного шага интегрирования окончательно выбирали после оценки их влияния на точность результатов численного моделирования.

Компьютерное моделирование конвективного теплопереноса в тепловом блоке экспериментальной установки при нестационарном внешнем нагреве и осевой скорости вращения 10 об/с проводили для сравнения в двухмерной и трехмерной постановках. Результаты моделирования для различных моментов времени представлены в виде картин температурных полей на рис. 2 для трехмерной постановки.

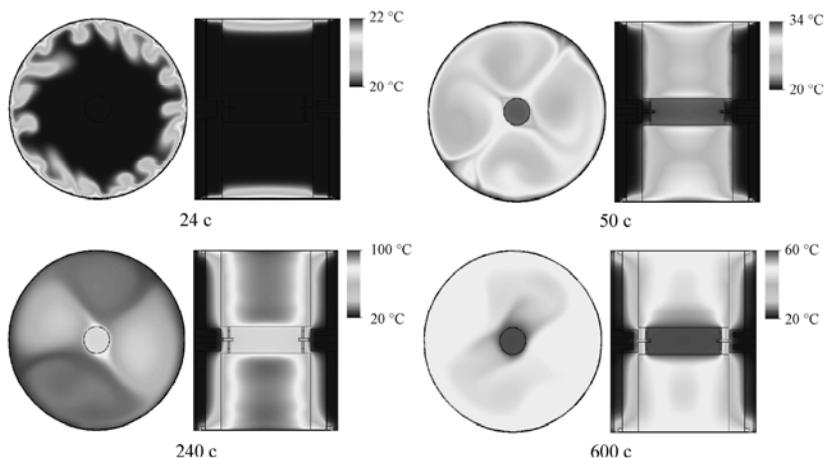


Рис. 2. Картины температурных полей в поперечном и продольном сечениях вращающегося теплового блока, подверженного нестационарному внешнему нагреву и последующему охлаждению, для различных моментов времени при трехмерном моделировании

Как видно из рис. 2, при трехмерном моделировании в тепловом блоке образуются трехмерные конвективные потоки, направленные от внешней нагретой оболочки внутрь к тепломеру. За счет этих потоков происходит интенсификация теплопереноса и, как следствие, рост температуры тепломера. После отключения нагрева на 240-й секунде корпус теплового блока начинает охлаждаться, при этом нагрев тепломера продолжается. Начиная с 360-й секунды, конвекция в тепловом блоке прекращается, и охлаждение тепломера происходит только за счет теплопроводности. Таким образом, в условиях осевого вращения происходит интенсификация конвективного переноса тепла к тепломеру при внешнем нагревании и снижение интенсивности этого процесса при охлаждении корпуса с последующим запирианием более теплых слоев воздуха, расположенных вблизи оси вращения, более холодными внешними слоями, что ранее уже отмечалось [2]. На рисунке 3 представлен сравнительный анализ результатов компьютерного моделирования и экспериментальных данных в виде совокупности температурных кривых тепломера.

Анализ температурных кривых (рис. 3, б) показал, что расхождение результатов вычислительного и физического экспериментов в случае трехмерного моделирования составляет менее 6,5%, а при двухмерном моделировании – более 30% в поперечном и более 60% в продольном сечениях. Поэтому проводить исследования конвективного теплообмена в замкнутых полостях в условиях нестационарного неравномерного внешнего нагрева и наличия осевого вращения с приемлемой точностью можно только на основе трехмерного моделирования.

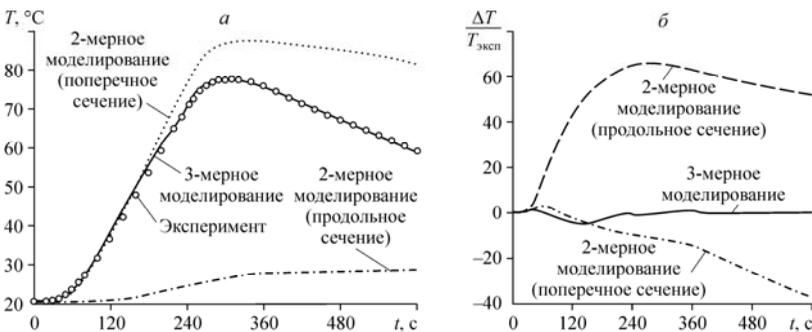


Рис. 3. Сравнение результатов компьютерного моделирования с экспериментальными данными, представленными на рис. 1:

а – температурные кривые;

б – относительная погрешность расчета температуры

Таким образом, на основе результатов физического и математического моделирования подтверждена гипотеза интенсификации процессов конвективного теплопереноса внутри замкнутых воздушных полостей при их внешнем нагреве и осевом вращении относительно продольной оси симметрии. Кроме этого, показано, что численное моделирование процессов конвективного теплопереноса в замкнутых вращающихся полостях следует проводить исключительно в трехмерной постановке, ибо только она не искажает физики данного процесса.

Список литературы

1. Ветров, В. В. Интенсификация теплопереноса через воздушные прослойки в условиях осевого вращения и внешнего нагрева / В. В. Ветров // Тез. докл. Четвертой МТФШ, Тамбов, 2001. – Тамбов: ТГТУ, 2001. – С. 27 – 31.
2. Ветров, В. В. Эффект конвективного теплового диода в замкнутых вращающихся объемах / В. В. Ветров, А. А. Воробьев // Тез. докл. Седьмой МТФШ, Тамбов, 2010. – Тамбов: ТГТУ, 2010. – Ч. I. – С. 66 – 73.
3. Дульнев, Г. Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре: учеб. для вузов / Г. Н. Дульнев. – М.: Высш. шк., 1984. – 247 с.
4. Теплопередача свободной конвекцией между двумя сферами, одна из которых размещена внутри другой с вертикальным эксцентриситетом / Н. Вебер, Р. Поу, Е. Бишоп, Д. Скэнлэн // Теплопередача. – 1973. – Т. I. – С. 49 – 55.
5. Пат. Российской Федерации на полезную модель № 120219, МПК G 01 K 17/00. Экспериментальная установка для определения характеристик теплообмена во вращающихся конструкциях / В. В. Ветров, С. И. Стреляев, А. А. Воробьев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО ТулГУ. № 2012112526/28; заявл. 02.04.2012; опубл. 10.09. 2012.
6. Ветров, В. В. Конвективный теплоперенос в замкнутых осесимметричных полостях различной конфигурации в условиях их осевого вращения и внешнего нагрева / В. В. Ветров, А. А. Воробьев // Теплофизика и аэромеханика. – 2017. – Т. 24, № 2. – С. 267 – 282.

THE STUDY OF CONVECTIVE HEAT TRANSFER IN A CLOSED ROTATING CONSTRUCTIONS

V. V. Vetrov, A. A. Vorobyev
Tula State University, Tula
andreyv_v@yandex.ru

Abstract. Based on the results of physical and mathematical modeling, the hypothesis of the intensification of the convective heat transfer processes inside the closed air cavities during their external heating and axial rotation relative to the longitudinal axis of symmetry is confirmed. It is shown that the numerical simulation of the processes of convective heat transfer in closed rotating cavities should be carried out in a three-dimensional setting.

Keywords: convective heat transfer, centrifugal field of mass forces, closed air cavity, rotation, convection coefficient.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА НЬЮТОНА–КАНТОРОВИЧА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБЪЕКТОВ

Ю. Ю. Громов, Ю. В. Минин, Н. Г. Шахов
*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный
технический университет», Тамбов*

Аннотация. Рассмотрено применение численных методов для решения моделей различных объектов, представленных нелинейными дифференциальными операторами при исследовании их теплофизических свойств.

Ключевые слова: численные методы, метод Ньютона–Канторовича, дифференциал Фреше, теплофизические свойства объектов.

При исследовании теплофизических свойств различных объектов их модели представляются нелинейными дифференциальными операторами. Найти решение таких моделей на основе аналитических методов невозможно. В связи с этим единственно возможный путь решения основывается на применении численных методов. В работе рассматривается одна из модификаций метода решения нелинейных уравнений.

Метод Ньютона–Канторовича основан на нахождении и вычислении дифференциала Фреше.

Проведем рассмотрение метода Ньютона–Канторовича.

Пусть U – решение уравнения

$$P(U) = 0, \quad (1)$$

где $P: E_1 \rightarrow E_2$ – дифференцируемое по Фреше нелинейное отображение, а E_1 и E_2 – линейные нормированные пространства.

Допустим, что U – найденное приближенное решение (1). Тогда итерационный процесс, задаваемый линейным уравнением:

$$P(U)^s * (U^{s+1} - U^s) = -P(U)^s, \quad (2)$$

где s – номер приближения ($s = 0, 1, 2, \dots$), позволяет найти связь приближенного решения U с предыдущими U^s .

Если существует линейный обратный оператор $[P'(U)]^{-1}$, то приходим к известному методу Ньютона–Канторовича [5]:

$$U^{s+1} = U^s - \left[P'(U)^s \right]^{-1} P(U)^s. \quad (3)$$

Часто построить обратный оператор в практических случаях возможно только приближенно.

Определение 1. Говорят, что оператор P дифференцируем по Фреше в точке $v \in E_1$, если

$$P(v+h) - P(v) = dP(v, h) + \omega(v, h), \quad (4)$$

где $dP(v, h)$ – линейная ограниченная функция (оператор) от h , причем

$$\lim_{h \rightarrow 0} \omega(v, h) / \|h\| = 0. \quad (5)$$

В равенстве (4) предполагается, что отображение P определено в шаре радиусом δ с центром в точке v , причем $\|h\| < \delta$.

$dP(v, h)$ называется дифференциалом Фреше, а ω – остатком дифференциала.

Если известен вид оператора $dP(v, h)$, т.е.

$$dP(v, h) = A(v)h,$$

где A – линейный ограниченный оператор, то пишут $A(v) = P'(v)$ и называют его производной Фреше.

В силу этого имеем

$$A(v) = \lim_{\|h\| \rightarrow 0} \frac{1}{\|h\|} \|P(v+h) - P(v) - P'(v) * h\|. \quad (6)$$

Поскольку уравнение (3) уже является линейным, но оно еще не разрешено относительно искомой функции, к нему можно применить разностную аппроксимацию на сетке и получить систему линейных алгебраических уравнений, которую решаем одной из модификацией метода исключения (применительно к системе линейных уравнений с трехдиагональной матрицей).

Рассмотрим нелинейное уравнение $P(u, v) = 0$, где отображение

$$P: E_1 \times E_2 \Rightarrow E_2$$

дважды непрерывно дифференцируемо.

В этом случае формула Тейлора имеет вид

$$P(u+h_1, v+h_2) = P(u, v) + d_u P(u, v) + d_v P(u, v) + r(u, v, h_1, h_2). \quad (7)$$

Отбрасывая $r(u, v, h_1, h_2)$, получим приближенное уравнение

$$P(u, v) + d_u P(u, v) + d_v P(u, v) = 0, \quad (8)$$

где $(u = u + h_1, v = v + h_2)$.

Далее рассмотрим систему

$$P_1(u, v) = 0, \quad P_2(u, v) = 0. \quad (9)$$

Применяя к системе (9) ранее рассмотренный аппарат и используя частные дифференциалы Фреше, получим следующее:

$$P_1(u, v) + d_u P_1(u, v) = P_1(u + h_1, v) + r_1(u, v, h_1), \quad (10)$$

$$P_2(u, v) + d_v P_2(u, v) = P_2(u, v + h_2) + r_2(u, v, h_2). \quad (11)$$

Отбрасывая в системе (10), (11) остаточные члены, мы приходим к следующей линейной системе:

$$P_1(u, v) + d_u P_1(u, v) = 0, \quad (12)$$

$$P_2(u, v) + d_v P_2(u, v) = 0. \quad (13)$$

И в данном случае метод Ньютона–Канторовича примет вид

$$P_{1u}(u^n, v^n)(u^{n+1} - u^n) = -P_1(u^n, v^n), \quad (14)$$

$$P_{2v}(u^n, v^n)(v^{n+1} - v^n) = -P_2(u^n, v^n). \quad (15)$$

Таким образом, в данной работе предлагается использование модификации метода Ньютона–Канторовича в качестве метода численного решения нелинейных уравнений при исследовании теплофизических свойств различных объектов.

USING THE NEWTON-KANTOROVICH METHOD IN THE STUDY THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF OBJECTS

Yu.Yu. Gromov, Yu. V. Minin, N. G. Shahov
Tambov State Technical University, Tambov

Abstract. The application of numerical methods for solving models of various objects represented by nonlinear differential operators in the study of their thermophysical properties is considered.

Keywords: numerical methods, Newton–Kantorovich method, Frechet differential, thermophysical properties of objects.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ОТВЕРЖДЕНИИ

О. С. Дмитриев, А. А. Живенкова, А. О. Дмитриев
*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный
технический университет», Тамбов*

Аннотация. Проведен анализ зависимостей теплофизических характеристик полимерных композиционных материалов в процессе отверждения. Предложены моделирующие зависимости теплофизических характеристик полимерных композитов от температуры, степени отверждения и содержания связующего.

Ключевые слова: моделирование, полимерные композиты, теплофизические характеристики.

Качество изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) существенно зависит от технологических режимов их получения, и возникает необходимость расчета температурно-временных режимов отверждения. В качестве метода нахождения оптимального режима отверждения целесообразно использовать математическое моделирование и оптимизацию, опираясь на измеренные свойства материала [1, 2].

В модели нагрева и отверждения ПКМ важными параметрами являются теплофизические характеристики (ТФХ) $C(T, \beta, \gamma)$, $\lambda(T, \beta, \gamma)$, зависящие от температуры T , степени отверждения β и содержания связующего γ . Учитывая сложность этих зависимостей, определить их экспериментально в таком виде за один опыт практически невозможно. Поэтому определение зависимости ТФХ от степени отверждения связующего и его содержания предлагается на основе некоторых температурных зависимостей ПКМ, используя при этом несложное математическое описание.

Определение зависимостей ТФХ $C(T, \beta, \gamma)$, $\lambda(T, \beta, \gamma)$ от степени отверждения β ПКМ по экспериментальным данным проводили, используя температурные зависимости ТФХ в крайних состояниях ПКМ, т.е. в отвержденном $C_{от}(T)$, $\lambda_{от}(T)$ и неотвержденном $C_{но}(T)$, $\lambda_{но}(T)$. Кроме того, для нахождения зависимости ТФХ от содержания свя-

зующего γ необходимы также ТФХ чистого отвержденного связующего $C_{от.св}(T)$, $\lambda_{от.св}(T)$.

Задача определения ТФХ отвержденного ПКМ не вызывает трудностей. Сложнее является задача определения ТФХ (особенно теплоемкости $C_{но}(T)$) неотвержденного материала. Это объясняется тем, что при нагреве образца полимерного композита на основе терморективного связующего до определенной температуры в нем начинает протекать химическая реакция отверждения, которая сопровождается экзотермическим эффектом. Поэтому определение ТФХ неотвержденного ПКМ проводили на основе эффективных ТФХ $C_{эф}(T)$, $\lambda_{эф}(T)$, измеренных в процессе отверждения до начала интенсивных тепловыделений, а ТФХ отвержденного композита, измеренных при нагреве полностью прореагировавшего образца материала – $C_{от}(T)$, $\lambda_{от}(T)$.

Проанализировав температурные зависимости эффективной теплоемкости $C_{эф}(T)$ при отверждении различных типов ПКМ и теплоемкости отвержденных композитов $C_{от}(T)$, было обнаружено, что экспериментальные кривые $C_{эф}(T)$ и $C_{от}(T)$ являются эквидистантными для любых температур ниже температуры начала процесса отверждения T_w . Кроме того, замечено, что теплоемкость неотвержденного композита (препрега) $C_{но}(T)$ больше теплоемкости отвержденного $C_{от}(T)$ на 10...20%. При отверждении, особенно на конечной стадии, наблюдается уменьшение теплоемкости от $C_{но}(T)$ до $C_{от}(T)$.

На основе температурных зависимостей ТФХ отвержденного $C_{от}(T)$, $\lambda_{от}(T)$ и неотвержденного $C_{но}(T)$, $\lambda_{но}(T)$ ПКМ, исследованных при известном значении $\gamma = \gamma_u$ и чистого отвержденного связующего $C_{от.св}(T)$, $\lambda_{от.св}(T)$, используя правило аддитивности, получена формула для расчета теплоемкости C в зависимости от температуры T , степени отверждения β и содержания связующего γ :

$$C(T, \beta, \gamma) = C_{но}(T, \gamma_u)(1 - \beta) \frac{\gamma}{\gamma_u} + C_{от}(T, \gamma_u) \left(\frac{1 - \gamma}{1 - \gamma_u} - \frac{(1 - \beta)\gamma}{\gamma_u} \right) + C_{от.св}(T) \frac{\gamma - \gamma_u}{1 - \gamma_u}.$$

Полученная объемная теплоемкость учитывает межфазные взаимодействия на границе смолы и наполнителя и является эффективной величиной для данной системы «связующее–наполнитель».

Также получена расчетная формула зависимости теплопроводности λ от температуры T , степени отверждения β и содержания связующего γ для полимерных композитов с волокнистым армирующим наполнителем:

$$\lambda(T, \beta, \gamma) = \left\{ \frac{\beta}{\frac{1}{3}[\gamma\lambda_{от.св}(T) + (1-\gamma)\lambda_{тк}(T)] + \frac{2}{3}\left[\frac{\gamma}{\lambda_{от.св}(T)} + \frac{1-\gamma}{\lambda_{тк}(T)}\right]^{-1}} + \frac{1-\beta}{\frac{1}{3}[\gamma\lambda_{н.св}(T) + (1-\gamma)\lambda_{тк}(T)] + \frac{2}{3}\left[\frac{\gamma}{\lambda_{н.св}(T)} + \frac{1-\gamma}{\lambda_{тк}(T)}\right]^{-1}} \right\}^{-1}$$

В формуле использованы исследованные при известном и фиксированном значении $\gamma = \gamma_u$ температурные зависимости теплопроводностей в отвержденном $\lambda_{от}(T)$ и неотвержденном $\lambda_{но}(T)$ состояниях ПКМ, теплопроводность сжатого волокнистого наполнителя $\lambda_{тк}(T)$, а также теплопроводности отвержденного $\lambda_{от.св}(T)$ и неотвержденно-го $\lambda_{н.св}(T)$ чистого связующего.

Аналогично, учитывая различные схемы армирования, получены формулы для расчета зависимости теплопроводности λ от температуры T , степени отверждения β и содержания связующего γ для тканевых и гранулированных ПКМ, в которых имеет место хаотичное распределение волокон.

В предложенных расчетных формулах все характеристики исследуемых ПКМ и другие параметры математической модели были экспериментально определены с использованием информационно-измерительной системы исследования процесса отверждения и свойств полимерных композиционных материалов [3, 4]. Тестирование полученных формул проводилось путем сравнения расчетных и экспериментальных зависимостей ТФХ, которое показало их адекватность и возможность для практического применения в задачах моделирования и оптимизации процесса отверждения ПКМ.

Список литературы

1. Определение оптимальных режимов отверждения толстостенных изделий из полимерных композитов / О. С. Дмитриев, В. Н. Кириллов, А. О. Дмитриев, А. В. Зуев // *Тепловые процессы в технике*. – 2013. – № 10. – С. 467 – 475.
2. Оптимизация режима отверждения изделий из полимерных композитов на основе клеевых препрегов / О. С. Дмитриев, В. Н. Кириллов, С. В. Мищенко, С. О. Дмитриев // *Клеи. Герметики. Технологии*. – 2009. – № 5. – С. 17 – 24.
3. 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.
4. Автоматизированная система исследования процесса отверждения композиционных полимерных материалов / С. В. Мищенко, О. С. Дмитриев, Н. П. Пучков, А. В. Шаповалов // *Промышленная теплотехника*. – 1989. – Т. 11, № 5. – С. 79 – 84.

MODELING OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS DURING CURING

O. S. Dmitriev, A. A. Zhyvenkova, A. O. Dmitriev

Tambov State Technical University, Tambov

Abstract. In this work, the analysis of dependences thermophysical characteristics of polymer composites during the curing process is performed. The modeling dependences of thermophysical characteristics of polymer composite materials on the temperature, the degree of cure and resin content are offered.

Keywords: modeling, polymer composites, thermophysical characteristics.

БЕСКОНТАКТНЫЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКОСТЕЙ

М. М. Мордасов, А. П. Савенков

*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет», Тамбов
mmm-tmb@rambler.ru; savencow@yandex.ru*

Аннотация. Представлены результаты исследований бесконтактных методов измерений вязкости и поверхностного натяжения жидкостей. Методы основаны на определении геометрических параметров деформации поверхности контролируемой жидкости под действием газовой струи.

Ключевые слова: плотность, вязкость, поверхностное натяжение, измерение, бесконтактный, струя, газ, жидкость, аэродинамический.

Большинство методов измерений и устройств для их реализации являются электрическими, однако часто в измерительной технике возникают проблемы, для решения которых наиболее рационально применять энергию сжатого газа. Пневматические методы в отличие от электрических аналогов обладают рядом преимуществ: они пожаро- и взрывобезопасны, обладают высокой надежностью при работе в условиях агрессивных и радиоактивных сред, могут работать при высоких температурах.

В последнее время нередко поднимается вопрос о бесконтактном контроле физических свойств веществ. Применение пневматических методов позволяет эффективно реализовать получение информации о свойствах объекта контроля, не приводя его в контакт со средством измерений.

На текущий момент авторами создана единая теория бесконтактных аэродинамических измерений физических свойств жидкостей. Уточнено определение термина «бесконтактный метод измерений» в отношении пассивных (вещественных) величин и сформулированы требования к проведению бесконтактных измерений. Получено математическое описание процесса динамического взаимодействия струи газа с поверхностью жидкости, позволяющее определять диапазоны и оценивать погрешности измерений свойств жидкостей различными бесконтактными аэродинамическими методами. На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований проведен сопоставительный анализ различных аэродинамических методов измерений свойств жидкостей и выбраны направления дальнейшего развития наиболее перспективных из них.

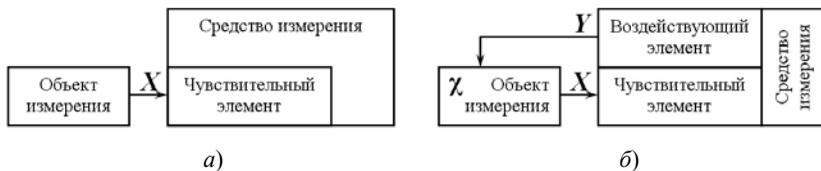


Рис. 1. Измерение активных (а) и пассивных (б) величин

Согласно определению, приведенному в РМГ 29–99 (в РМГ 29–2013 определение отсутствует), для того чтобы метод измерений был бесконтактным, необходимо лишь отсутствие контакта чувствительного элемента средства измерений, реализующего метод, с объектом измерения. Очевидно, что в случае измерения пассивных величин этого не достаточно, так как необходимо также обеспечить отсутствие контакта элементов устройства, оказывающих воздействие на объект (стимуляция объекта) [1]. Для измерений пассивных величин в средстве измерений необходимо использовать вспомогательный источник энергии, с помощью которого формируется сигнал измерительной информации X , т.е. пассивная величина χ с помощью активной величины Y преобразуется в активную величину X , которая и измеряется (рис. 1).

Признаком контактного средства измерений является контакт хотя бы одного из его элементов с объектом измерений. Признаком контактного метода является необходимость контакта какого-либо элемента средства с объектом измерений, без чего метод не может быть реализован.

В условиях земного притяжения любая жидкость, подлежащая контролю, должна находиться в сосуде. Для признания метода измерений бесконтактным сосуд с контролируемой жидкостью не должен быть частью средства измерений, а его форма и размеры в определенных пределах не должны оказывать влияния на результат измерения.

Аэродинамические бесконтактные методы измерений физических свойств жидкостей основаны на определении изменений геометрических параметров поверхности контролируемой жидкости, деформированной струей газа. Среди других бесконтактных аэродинамические методы измерений вязкости и поверхностного натяжения являются единственными, обеспечивающими получение достоверных результатов при вязкости более 0,1 Па·с.

Для математического описания взаимодействия струи газа с поверхностью жидкости, исходя из теоремы об изменении количества движения, авторами получено уравнение баланса сил на поверхности раздела газовой и жидкой фаз при постоянном аэродинамическом воздействии [2]:

$$k\mu d^2 P/2 = \rho g V + \sigma \cdot \max[f_\sigma(y)], \quad (1)$$

где k – коэффициент формы углубления, образованного газовой струей на поверхности жидкости; μ и d – коэффициент расхода и диаметр отверстия истечения струи; P – давление перед отверстием истечения; ρ – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения; V – объем углубления; σ – ускорение свободного падения; $f_\sigma(y) = 2\pi r(y) \sin\beta(y)$ – функция, описывающая изменение силы поверхностного натяжения по вертикали; $r(y)$ – математическое описание образующей углубления в декартовых координатах $y-r$; β – угол наклона касательной к образующей углубления относительно горизонтали (ось r).

В динамическом режиме взаимодействия газа и жидкости при изменении давления P влияние на форму углубления оказывают силы вязкого трения и инерции. С учетом этих сил получено дифференциальное уравнение двухфазной системы «струя газа–жидкость» [3]:

$$\frac{1}{2} \pi R_{05}^3 \rho \frac{d^2 h}{dt^2} + b_\eta \pi R_{05} \eta \frac{dh}{dt} + b_\rho \pi g R_{05}^2 \rho h + b_\sigma \pi \sigma h = k \frac{\mu \pi d^2}{2} P, \quad (2)$$

где R_{05} – радиус углубления на уровне половины его высоты; b_η , b_ρ и b_σ – безразмерные коэффициенты; h – высота углубления.

В уравнении (2) использованы аппроксимирующие зависимости выталкивающей и поверхностной сил от высоты h углубления. Уравнение (2) описывает связь основной выходной величины системы «струя газа–жидкость», геометрического параметра h углубления, с основной входной величиной – давлением P .

С использованием дифференциального уравнения (2) получены другие динамические характеристики системы «струя газа–жидкость»: передаточная функция и частотные характеристики. Составлена структурная схема (рис. 2). Передаточная функция имеет вид

$$W_h(s) = \frac{\frac{k\mu d^2}{2b_\rho \rho g R_{05}^2}}{\frac{R_{05}}{2b_\rho g} s^2 + \frac{b_\eta \eta}{b_\rho \rho g R_{05}} s + 1}, \quad (3)$$

где s – параметр преобразования Лапласа, s^{-1} .

С использованием математического описания (уравнения (1)–(3)) проведены теоретические исследования различных методов измерений поверхностного натяжения и вязкости жидкостей. Результаты теоретических исследований подтверждены экспериментально.

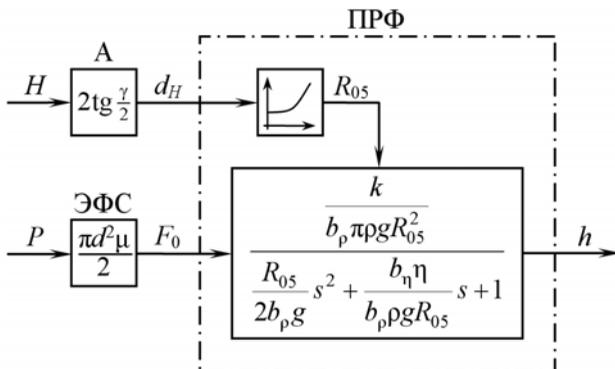


Рис. 2. Структурная схема двухфазной системы «струя газа–жидкость»:

А – атмосфера; ЭФС – элемент формирования струи;
 ПРФ – поверхность раздела фаз; H – расстояние от отверстия истечения (ЭФС) струи до поверхности жидкости

Установлено, что для снижения влияния вязкости и плотности контролируемой жидкости на результат измерения ее поверхностного натяжения необходимо уменьшать степень деформации поверхности раздела фаз. Разработан бесконтактный аэродинамический метод измерений поверхностного натяжения, при реализации которого высота h углубления составляет $\sim 0,1$ мм, а для определения степени деформации использованы собирающие свойства деформированной поверхности [4]. Приведенная погрешность измерения поверхностного натяжения, определенная экспериментально, в диапазоне $20 \dots 80$ мН/м не превышает 2%.

Проведен сопоставительный анализ различных бесконтактных аэрогидродинамических методов измерений вязкости жидкостей. Рассмотрены методы на основе колебательного режима взаимодействия газа и жидкости [5], на основе вынужденных колебаний поверхности жидкости [3] и импульсные методы [6].

В колебательном режиме взаимодействия газа и жидкости форма углубления непрерывно изменяется при постоянном аэродинамическом воздействии. Для определения вязкости достаточно создать аэродинамическое воздействие на поверхность контролируемой жидкости и измерить частоту ее колебаний. В методах на основе вынужденных колебаний их частота определяется внешним генератором переменного аэродинамического воздействия. О вязкости судят по частоте колебаний, при которой их амплитуда или сдвиг фаз достигает заданного значения. При реализации импульсных методов о вязкости судят по

времени достижения заданной степени деформации поверхности контролируемой жидкости с момента подачи газовой струи.

Теоретические и экспериментальные исследования позволили установить, что наименьшее влияние плотности и поверхностного натяжения контролируемой жидкости на результат измерения ее вязкости характерно для импульсных методов. При изменении величин ρ и σ на 10% относительная погрешность для метода измерения вязкости по амплитуде вынужденных колебаний составляет 26%, по фазе – 10%, для импульсных методов – не более 1,5%.

Нижний предел измерений вязкости бесконтактными аэрогидродинамическими устройствами определяют соотношения силы вязкого трения F_η с силами инерции F_m и гидродинамического сопротивления F_d . Из условия преобладания силы вязкого трения над силой гидродинамического сопротивления получена формула для оценки наименьшего достижимого нижнего предела измерений

$$\eta_* = \sqrt{\frac{F_\eta \rho}{72\pi}} \approx 0,066 \sqrt{F_\eta \rho} . \quad (4)$$

Для $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ и силы F_η из диапазона 1...20 мН величина η_* составляет 0,07...0,30 Па·с.

Из дифференциального уравнения (2) следует, что при вязкости $\eta < \eta_{\min}$ звено ПРФ (рис. 2) является колебательным, а при $\eta \geq \eta_{\min}$ – аperiодическим второго порядка. Минимальное значение η_{\min} вязкости определяется исходя из условия получения неотрицательных значений дискриминанта характеристического уравнения. Для случаев преобладания выталкивающей и поверхностной сил получим соответствующие выражения:

$$\eta_{\min} = \frac{\rho R_{05}}{b_\eta} \sqrt{2b_\rho g R_{05}} , \quad (5)$$

$$\eta_{\min} = \frac{\sqrt{2b_\sigma R_{05} \rho \sigma}}{b_\eta} . \quad (6)$$

При $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$; $\sigma = 0,05 \text{ Н/м}$; $R_{05} = 3 \text{ мм}$; $b_\eta = 2,1$; $b_\rho = 1,5$; $b_\sigma = 1,36$ и $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ по формулам (5) и (6) получим значения η_{\min} , равные 0,42 и 0,3 Па·с соответственно.

В результате анализа изменения амплитудной частотной, фазовой частотной и переходной характеристик системы «струя газа–жидкость» при изменении вязкости в окрестности η_{\min} с использованием выражений (4) – (6) произведена оценка нижнего предела измерений вязкости

для различных аэрогидродинамических методов. Для устройств, реализующих методы на основе вынужденных колебаний, нижний предел составляет 0,1 Па·с, для импульсных устройств – 0,15 Па·с.

Учитывая, что разница в нижнем пределе измерений вязкости невелика, но импульсные аэрогидродинамические устройства отличаются значительно меньшей чувствительностью к плотности и поверхностному натяжению, в качестве наиболее перспективного выбран бесконтактный импульсный аэрогидродинамический метод с перпендикулярным аэродинамическим воздействием. Другими преимуществами импульсного метода являются: наличие возможности измерения вязкости неньютоновских жидкостей, меньшие затраты времени при измерении высокой вязкости, простота устройства для реализации метода.

Применение перпендикулярного аэродинамического воздействия (угол $\alpha = 30 \dots 40^\circ$) в импульсном методе позволяет увеличить степень деформации поверхности контролируемой жидкости, что ведет к дополнительному снижению влияния поверхностного натяжения на результаты измерения. Большая деформация поверхности жидкости способствует разрушению пленок загрязнений и приближает результат измерения к вязкости в объеме жидкости. Устройство для реализации импульсного аэрогидродинамического метода с перпендикулярным аэродинамическим воздействием прошло экспериментальные исследования. Относительная погрешность измерения вязкости в диапазоне 1...50 Па·с не превышает 3%.

Список литературы

1. Мордасов, М. М. Особенности применения термина «бесконтактный метод измерения» / М. М. Мордасов, А. П. Савенков, К. Е. Чечетов // Датчики и системы. – 2017. – № 4. – С. 47 – 52.
2. Мордасов, М. М. Методика исследования взаимодействия струи газа с поверхностью жидкости / М. М. Мордасов, А. П. Савенков, К. Е. Чечетов // Журнал технической физики. – 2016. – Т. 86, вып. 5. – С. 20 – 29.
3. Мордасов, М. М. Бесконтактный неразрушающий аэрогидродинамический контроль вязкости жидкостей / М. М. Мордасов, А. П. Савенков // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2008. – Т. 74, № 2. – С. 22 – 25.
4. Бесконтактный метод измерения поверхностного натяжения / М. М. Мордасов, А. П. Савенков, М. Э. Сафонова, В. А. Сычев // Измерительная техника. – 2018. – № 6. – С. 55 – 60.
5. Гализдра, В. И. Бесконтактный аэрогидродинамический метод измерения вязкости жидких веществ / В. И. Гализдра, М. М. Мордасов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2000. – Т. 66, № 6. – С. 37 – 39.
6. Мордасов, М. М. Пневматическое бесконтактное измерение вязкости жидкостей / М. М. Мордасов, А. П. Савенков // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2009. – Т. 75, № 2. – С. 33 – 37.

NON-CONTACT AERODYNAMIC METHODS FOR MEASUREMENTS OF PHYSICAL PROPERTIES OF LIQUIDS

M. M. Mordasov, A. P. Savenkov

*Tambov State Technical University, Tambov
mmm-tmb@rambler.ru; savencow@yandex.ru*

Abstract. The results of the analysis of the methods for measuring the viscosity and surface tension of liquids are presented. The methods are based on the determining the geometrical parameters of the tested liquid surface deformation caused by the gas jet impingement.

Keywords: density, viscosity, surface tension, measurement, contactless, jet, gas, liquid, aerodynamic.

НОВЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИТИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПЕРЕНОСА

Е. В. Ненахов¹, Э. М. Карташов²

¹Московский авиационный институт, Москва

²МИРЭА – Российский технологический университет, Москва
newnew94@mail.ru

Аннотация. Для теплопроводности, диффузии, электропроводности и других явлений термодинамика необратимых процессов основана на обобщенной системе уравнений Онзагера для потоков субстанций. Система уравнений приводит к важным соотношениям, из которых можно получить уравнение переноса гиперболического типа, и соответствующим краевым задачам нестационарной теплопроводности обобщенного типа. Такие задачи значительно отличаются от классических, являясь более сложными при нахождении аналитических решений этих задач. В то же время, несмотря на развитые подходы для обобщенных тепловых задач, еще остались математические резервы, позволяющие существенно упростить аналитические решения за счет оптимальных преобразований, приводящих к новым функциональным конструкциям, не известным ранее. Этим вопросам посвящена настоящая публикация.

Ключевые слова: конечная скорость распространения теплоты, уравнение переноса, нестационарная теплопроводность.

Теория процессов переноса в системах $\bar{\Omega} = \{M(x, y, z) \in \bar{D} = D + S, t > 0\}$, не находящихся в состоянии термодинамического равновесия, объединяет такие разнообразные явления, как теплопроводность, диффузию, электропроводность, поглощение звуковых волн и др. Для этих явлений термодинамика необратимых процессов основана на обобщенной системе уравнений Онзагера для потоков субстанций $\bar{J}_i(M, t)$ (теплоты, массы и др.), имеющей для изотропной среды вид [1]

$$\bar{J}_i(M, t) = L_i^{(r)} \frac{\partial \bar{J}_i(M, t)}{\partial t} + \sum_{k=1}^N \left[L_{ik} \bar{X}_k(M, t) + L'_{ik} \frac{\partial \bar{X}_k(M, t)}{\partial t} \right], \quad (1)$$

где $\bar{X}_k(M, t)$ – термодинамические движущие силы (градиент температуры, концентрации вещества и др.), $L_i^{(r)}$; L_{ik} , L'_{ik} – постоянные феноменологические коэффициенты переноса. Соотношение (1) имеет важное

значение для развития модельных представлений в теории переноса. Если в выражении (1) пренебречь производной по времени от движущей силы и положить $\bar{J}_i(M, t) = \bar{q}(M, t)$, $L_i^{(r)} = -\tau_r$, $L_{ik} = -\lambda$, $L'_{ik} = 0$, приходим к обобщенному закону переноса на уровне элементарных актов:

$$\bar{q}(M, t) = -\lambda \operatorname{grad} T(M, t) - \tau_r \frac{\partial \bar{q}(M, t)}{\partial t}, \quad (2)$$

учитывающих конечную скорость распространения теплоты. Из выражения (2) следует, что в соотношении Фурье внесена поправка на величину сокращения теплового потока, обусловленного задержкой во времени процесса передачи кванта энергии на микроуровне относительно момента его получения от элементарного объема тела к соседним элементам. Коэффициент τ_r – время тепловой релаксации, связанное со скоростью распространения теплоты v_T соотношением $v_T = \sqrt{a/\tau_r}$ (a – температуропроводность). Уравнение энергии для изотропных твердых тел $c_p \frac{\partial T(M, t)}{\partial t} = -\operatorname{div} \bar{q}(M, t)$ и соотношение (2) приводят к уравнению переноса гиперболического типа

$$\frac{\partial T(M, t)}{\partial t} = a \Delta T(M, t) - \tau_r \frac{\partial^2 T(M, t)}{\partial t^2}, M \in D, t > 0 \quad (3)$$

и соответствующим краевым задачам нестационарной теплопроводности обобщенного типа. В последние годы при изучении ряда теплофизических процессов усилился интерес к моделям теплопереноса для уравнения (3). В работе [2] развита теория математической постановки краевых задач обобщенного типа для уравнения (3). Такие задачи значительно отличаются от классических [2], являясь более сложными при нахождении аналитических решений этих задач. В то же время, несмотря на развитые подходы для обобщенных тепловых задач, еще остались математические резервы, позволяющие существенно упростить аналитические решения за счет оптимальных преобразований, приводящих к новым функциональным конструкциям, не известным ранее.

Предлагаемые подходы рассмотрим на примере нагрева однородного изотропного стержня $z \geq 0$ с начальной температурой T_0 . Граничная поверхность стержня $z = 0$ при $t > 0$ находится либо в условиях температурного нагрева температуры T_c (температура стержня $T_1(z, t)$), либо теплового нагрева потоком теплоты q_0 (температура стержня $T_2(z, t)$),

либо нагрева средой температурой T_c (температура стержня $T_3(z, t)$).
 Соответствующие модели в безразмерных переменных $\xi = z/\sqrt{a\tau_r}$,
 $\tau = t/\tau_r$, $Bi^* = h\sqrt{a\tau_r}$, $W_i(\xi, \tau) = [T_i(z, t) - T_0]/(T_c - T_0)$, $i = 1, 3$,
 $W_2(\xi, \tau) = [T_2(z, t) - T_0]/(q_0\sqrt{a\tau_r}/\lambda)$ имеют вид:

$$\frac{\partial W_i}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 W_i}{\partial \xi^2} - \frac{\partial W_i}{\partial \tau^2}, \xi > 0, \tau > 0 (i = 1, 2, 3); \quad (4)$$

$$W_i(\xi, \tau)|_{\tau=0} = \partial W_i(\xi, \tau)/\partial \tau|_{\tau=0} = 0, \xi \geq 0; \quad (5)$$

$$W_1(\xi, \tau)|_{\xi=0} = 1; \int_0^\tau \frac{\partial W_2(\xi, \tau')}{\partial \xi} \Big|_{\xi=0} \exp[-(\tau - \tau')] = -1, \tau > 0; \quad (6)$$

$$\int_0^\tau \frac{\partial W_3(\xi, \tau')}{\partial \xi} \Big|_{\xi=0} \exp[-(\tau - \tau')] d\tau' = Bi [W_3(\xi, \tau)|_{\xi=0} - 1], \tau > 0; \quad (7)$$

$$|W_i(\xi, \tau)| < \infty, \xi \geq 0, \tau \geq 0 (i = 1, 2, 3). \quad (8)$$

Вначале рассмотрим классический подход. Операционное решение задачи (4) – (8) по Лапласу $\overline{W}_i(\xi, p) = \int_0^\infty W_i(\xi, \tau) \exp(-p\tau) d\tau$ имеет вид

$$\overline{W}_i(\xi, p) = \overline{f}_i(p) \exp[-\xi\sqrt{p(p+1)}], \quad (9)$$

где $\overline{f}_1(p) = (1/p)$, $\overline{f}_2(p) = \sqrt{p+1}/p^{3/2}$, $f_3(p) = \frac{Bi^* \sqrt{p+1}}{p(\sqrt{p} + Bi^* \sqrt{p+1})}$,

находим в пространстве оригиналов

$$\begin{aligned} W_i(\xi, \tau) = & \\ = & \left[f_i(\tau - \xi) \exp(-\xi/2) + (\xi/2) \int_\xi^\tau f_i(\tau - \tau') \exp(-\tau'/2) \frac{I_1\left(\frac{1}{2}\sqrt{\tau'^2 - \xi^2}\right)}{\sqrt{\tau'^2 - \xi^2}} d\tau' \right] \times \\ & \times \eta(\tau - \xi), \end{aligned} \quad (10)$$

$$\text{где } f_1(\tau) = 1, \quad f_2(\tau) = \int_0^{\tau} \left[\exp(-\tau') / \sqrt{\pi\tau'} + \Phi(\tau') / \sqrt{\pi(\tau - \tau')} \right] d\tau', \quad f_3(\tau) = \\ = 1 - \gamma_1 \exp(-\gamma_2\tau) - \gamma_3 \int_0^{\tau} \left(\frac{1}{\sqrt{\pi\tau'}} + \sqrt{\gamma_1} \exp(\gamma_1\tau) \Phi(\sqrt{\gamma_1\tau'}) \right) \frac{\exp(-\tau')}{\sqrt{\pi(\tau - \tau')}} d\tau',$$

$\gamma_1 = (1 - Bi^{*2})^{-1}$, $\gamma_2 = 1 - \gamma_1$, $\gamma_3 = (1 - \gamma_1) / Bi^*$, $\Phi(z)$ – функция Лапласа, $\eta(z)$ – функция Хевисайда. Теперь рассмотрим новые аналитические формы для решения (10). Вначале изучим случай $i = 1$. Найдем $W_1(\xi, \tau)$, вычисляя непосредственно интеграл Римана–Меллина, учитывая, что изображение в выражении (9) ($i = 1$) имеет две точки ветвления $p = 0$ и $p = -1$. После вычисления интеграла устанавливаем эквивалентность решения в форме (10) ($i = 1$) и новой формы

$$W_1(\xi, \tau) = \left[1 - \frac{1}{\pi} \int_0^1 \exp(-p\tau) \frac{\sin \xi \sqrt{p(1-p)}}{p} dp \right] \eta(\tau - \xi) = \psi_1(\xi, \tau) \eta(\tau - \xi). \quad (11)$$

Новое выражение для $W_2(\xi, \tau)$ получим исходя из соотношения $\overline{W}_2(\xi, \tau) = -(1/p) d\overline{W}_1(\xi, p) / d\xi$. Переходя к оригиналам, но уже с учетом соотношения (11), находим

$$W_2(\xi, \tau) = \left\{ \begin{aligned} & 1 - \frac{1}{\pi} \int_0^1 \exp(-p\xi) \frac{\sin \xi \sqrt{p(1-p)}}{p} dp + \\ & + \frac{1}{\pi} \int_0^1 [\exp(-p\xi) - \exp(-p\tau)] \frac{\sqrt{1-p} \cos \xi \sqrt{p(1-p)}}{p^{3/2}} dp \end{aligned} \right\} \eta(\tau - \xi). \quad (12)$$

Аналогичными рассуждениями находим первое аналитическое решение третьей краевой задачи (4) – (8):

$$W_3(\xi, \tau) = \left\{ 1 - \frac{1}{\pi} \int_0^1 \frac{\sqrt{1-p}}{p} \exp(-p\tau) \left[\begin{aligned} & \frac{Bi^{*2} \sqrt{1-p}}{Bi^{*2}(1-p) + p} \sin(\xi \sqrt{p(1-p)}) + \\ & + \frac{Bi^* \sqrt{1-p}}{Bi^{*2}(1-p) + p} \cos(\xi \sqrt{p(1-p)}) \end{aligned} \right] dp \right\} \eta(\tau - \xi). \quad (13)$$

Но на этом проблема не исчерпывается, покажем далее, что решения $W_i(\xi, \tau)$ для $i = 2, 3$ могут быть записаны через одну функцию в (11) $\psi_1(\xi, \tau)$. Имеем из выражения (9) для $i = 2$:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\bar{W}_2(\xi, p)}{d\xi} &= -\bar{W}_1(\xi, p) - p\bar{W}_1(\xi, p), \xi > 0, \\ \bar{W}_2(\xi, p)\Big|_{\xi=\infty} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

откуда $\bar{W}_2(\xi, p) = \int_{\xi}^{\infty} \bar{W}_1(y, p) dy + p \int_{\xi}^{\infty} \bar{W}_1(y, p) dy$. Переходя к оригиналам, находим

$$W_2(\xi, \tau) = \int_{\xi}^{\tau} \psi_1(y, \tau) dy + (\partial/\partial\tau) \int_{\xi}^{\tau} \psi_1(y, \tau) dy, \tau > \xi. \quad (15)$$

При $i = 3$ из выражения (9) следует

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\bar{W}_3(\xi, p)}{d\xi} - Bi^*(p+1)\bar{W}_3(\xi, p) &= -Bi^*(p+1)\bar{W}_1(\xi, p), \tau > \xi, \\ \bar{W}_3(\xi, p)\Big|_{\xi=\infty} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

откуда $\bar{W}_3(\xi, p) = Bi(p+1) \int_{\xi}^{\infty} e^{-Bi(y-\xi)} \cdot e^{-Bi(y-\xi)p} \bar{W}_1(y, p) dy$. В пространстве оригиналов получаем

$$\begin{aligned} W_3(\xi, \tau) &= Bi \int_{\xi}^{\frac{\tau+Bi^*\xi}{1+Bi^*}} \exp[-Bi^*(y-\xi)] \psi_1[y, \tau - Bi^*(y-\xi)] dy + \\ &+ Bi^*(\partial/\partial\tau) \int_{\xi}^{\frac{\tau+Bi^*\xi}{1+Bi^*}} \exp[-Bi^*(y-\xi)] \psi_1[y, \tau - Bi^*(y-\xi)] dy, \tau > \xi. \end{aligned} \quad (17)$$

Представлены новые аналитические решения гиперболических моделей переноса в виде новых интегральных соотношений, удобных для числовых экспериментов. Метод может быть распространен на случаи, когда области теплопереноса ограничены внутри либо цилиндрической полостью, либо сферической полостью. Эти важные для практики случаи в аналитической теплофизике пока не рассмотрены.

Список литературы

1. Лыков, А. В. Теплообмен: справочник / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
2. Карташов, Э. М. Аналитические методы теории теплопроводности и ее приложений / Э. М. Карташов, В. В. Кудинов. – М.: URSS, 2018. – 1080 с.

NEW RELATIONS FOR ANALYTIC SOLUTIONS OF HYPERBOLIC TRANSFER MODELS

E. V. Nenakhov¹, E. M. Kartashov²

¹*Moscow Aviation Institute, Moscow*

²*MIREA – Russian University of Technology, Moscow*
newnew94@mail.ru

Abstract. For the heat, diffusion, electrical conductivity and other phenomena of the thermodynamics of irreversible processes it is based on the generalized system of Onsager's equations for flows of substances. The system of equations leads to important relations from which one can obtain a transport equation of hyperbolic type and corresponding boundary value problems of nonstationary heat conductivity of generalized type. Such problems differ significantly from classical ones, being more complicated when finding analytical solutions to these problems. At the same time, despite the developed approaches for generalized thermal problems, there are still mathematical reserves that make it possible to substantially simplify the analytical solutions due to optimal transformations leading to new functional constructions unknown earlier. These issues are the subject of this publication.

Keywords: finite velocity of heat propagation, transport equation, nonstationary heat conductivity.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ПЛОСКОМ АНИЗОТРОПНОМ ПОРИСТОМ КАНАЛЕ

А. В. Николенко¹, В. И. Ряжских¹, О. Л. Ерин²

¹*ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет», Воронеж*

²*Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского
и Ю. А. Гагарина», Воронеж*

Аннотация. В приближении Дарси-Бринкмана сформулирована математическая модель теплообмена в пористом плоском канале при граничных условиях первого рода, показана возможность ее физической линеаризации.

Ключевые слова: теплоноситель, теплообмен, пористая среда, обменный элемент.

Введение. Классические методы и способы интенсификации теплопередачи за счет построения топологии развития поверхности теплообмена, по-видимому, исчерпали себя [1]. Применение материалов со сверхразвитой поверхностью теплопередачи, таких как пористые структуры существенно интенсифицируют процесс передачи теплоты в различных энергетических системах [2].

Постановка задачи. Основным носителем анизотропности является характеристика пористой среды, так называемая проницаемость, которая в данном случае математически имеет тензорную природу. Учитывая, как правило, что теплоноситель через пористые среды движется в ламинарном режиме, в основу математической модели положены уравнения Дарси-Бринкмана [3], которые в стационарном виде таковы

$$\Delta \bar{V} = 0, \quad (1)$$

$$\left(\frac{\bar{V}}{\varepsilon} \right) \cdot \nabla \bar{V} = \frac{\varepsilon}{\rho} \left[-\nabla P + \frac{\eta}{\varepsilon} \left(\frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial y^2} \right) \right], \quad (2)$$

$$\bar{V} \cdot \nabla T' = \frac{1}{\rho C_p} \left(\nabla \cdot (\bar{\lambda} \nabla T') \right), \quad (3)$$

где \bar{V} – вектор скорости; P – давление жидкости; T' – температура; ε – пористость; ρ , μ , C_p – плотность, вязкость и массовая теплоемкость теплоносителя соответственно.

Проницаемость определяется следующим тензором

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} K_1 \cos^2 \theta + K_2 \sin^2 \theta & (K_1 - K_2) \sin \theta \cos \theta \\ (K_1 - K_2) \sin \theta \cos \theta & K_2 \cos^2 \theta + K_1 \sin^2 \theta \end{bmatrix}, \quad (4)$$

в котором K_1 и K_2 – проницаемости по направлениям, отличающимся на угол θ от декартовых осей в случае формулировки задачи в формате 2D.

Рассмотрен плоский горизонтальный канал, для которого декартова система координат имеет следующую ориентацию: ось ординат направлена по потоку, ось абсцисс перпендикулярна стенкам канала, тогда система (1) – (3) примет следующий вид

$$\begin{aligned} \frac{U}{\varepsilon^2} \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{V}{\varepsilon^2} \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\text{Pr}}{\varepsilon} \left[\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right] - \\ - \frac{\text{Pr}}{\text{Da}} \left[U \left(\cos^2 \theta + \lambda^* \sin^2 \theta \right) + V \left((1 - \lambda^*) \sin \theta \cos \theta \right) \right], \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{U}{\varepsilon^2} \frac{\partial V}{\partial X} + \frac{V}{\varepsilon^2} \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\text{Pr}}{\varepsilon} \left[\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right] - \\ - \frac{\text{Pr}}{\text{Da}} \left[U \left((1 - \lambda^*) \sin \theta \cos \theta \right) + V \left(\lambda^* \cos^2 \theta + \sin^2 \theta \right) \right], \end{aligned} \quad (6)$$

$$U \frac{\partial T}{\partial X} + V \frac{\partial T}{\partial Y} = \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \lambda^* \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2}. \quad (7)$$

Выводы. В предположении однонаправленности течения данная система упрощена путем физической линеаризации, из которой следует несопряженный характер гидродинамической и тепловой подзадач. Полученная модель положена в основу численного определения полей температур и скоростей теплоносителя в пористом канале при тепловых граничных условиях второго рода.

Список литературы

1. Калинин, Э. К. Интенсификация теплообмена в каналах; 3-е изд., перераб. и доп. / Э. К. Калинин, Г. А. Дрейцер, С. А. Ярхо. – Машиностроение, 1990. – 208 с.

2. Ingham, D. B. Transport phenomena in porous media. V. III. / D. B. Ingham, I Pop. – New York: Elsevier, 2005. – 467 p.

3. Abdelraheem, M. Aly. An incompressible smoothed particle hydrodynamics method for natural/mixed convection in a non-Darcy anisotropic porous medium / M. Aly Abdelraheem, E. Ahmed Sameh // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2014. – V. 77. – P. 1155 – 1168.

MATHEMATICAL MODEL OF HEAT AND MASS TRANSFER IN A PLANE ANISOTROPIC POROUS CHANNEL

A. V. Nikolenko¹, V. I. Ryazhskih¹, O. L. Erin²

¹*Voronezh State Technical University, Voronezh*

²*Military Educational and Scientific Center of the Air Force*

“N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy”, Voronezh

Abstract. In the Darcy-Brinkman approximation, a mathematical model of heat transfer in a porous flat channel under boundary conditions of the first kind was formulated, the possibility of its physical linearization is shown.

Keywords: heat carrier, heat transfer, porous medium, exchange element.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

С. В. Резник, П. В. Просунцов

*Московский государственный
технический университет имени Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет), Москва
sreznik@bmstu.ru*

Аннотация. Перспективы освоения космического пространства в значительной мере связаны с возможностями улучшения технических характеристик средств выведения в космос и создания все более совершенных космических аппаратов различного назначения. Большие преимущества в совершенствовании ракетно-космической техники открывает применение композиционных материалов. Приведены общие требования к ракетно-космическим композитным конструкциям. Выделены особенности композиционных материалов и конструкций, существенные для теплового проектирования. На ряде примеров показаны подходы, позволяющие успешно преодолевать возникающие теплофизические проблемы.

Ключевые слова: ракетно-космическая техника, композиционные материалы, радиационно-кондуктивный теплообмен, моделирование.

С середины 1950-х годов применение композиционных материалов (КМ) позволило решить ряд беспрецедентных по сложности задач в области ракетно-космической техники: преодолеть «тепловой барьер», вызванный интенсивным аэродинамическим нагревом головных частей управляемых баллистических ракет дальнего действия, осуществить возвращение на землю пилотируемых и беспилотных космических аппаратов (КА) с первой и второй космической скоростью, выполнить посадку исследовательских зондов на Венеру и Марс, создать мобильные и шахтные комплексы с ракетами на смесевом твердом топливе с композитными корпусами и транспортно-пусковые контейнеры к ним, реализовать идею многозаказности космической техники [1 – 3]. Ключевое значение для решения перечисленных задач имели методы теплофизики.

Характерными особенностями тепловых процессов в современных ракетно-космических композитных конструкциях (РККК) являются: широкий диапазон применения (3...2500 К), высокие градиенты температуры (1000 град/мм) и значительные темпы нагрева (иногда

более 100 К/с) в теплозащитных покрытиях, периодичность тепловых воздействий (низкоорбитальные КА – 17 теплосмен в сутки с длительностью теневого участка около 30 мин; КА на геостационарной орбите – дважды в течение года по 45 суток с длительностью теневого участка около 71 мин). Другие особенности обусловлены сложными пространственными формами РККК, сильным отличием теплофизических и оптических характеристик КМ и других материалов [4].

Практически во всех проектах новых отечественных и зарубежных ракет-носителей и КА планируется широко использовать КМ благодаря их уникальному сочетанию сравнительно малой плотности, высокой химической, радиационной стойкости, высокой прочности и жесткости, возможности глубокого регулирования теплофизических и оптических характеристик. Эти качества КМ одинаково ценны для создания крупногабаритных космических конструкций (трансформируемых рефлекторов космических антенн, солнечных батарей, конструкций большого объема для орбитальных и напланетных сооружений) и малых КА (микро- и наноспутников). Применение КМ в сочетании с традиционными средствами терморегулирования позволяет обеспечить заданный тепловой режим, а также стабильность формы и размеров конструкций при периодически меняющихся тепловых нагрузках, вызывающих возникновение температурных деформаций. Разработка новых проектов и появление новых КМ делают актуальным совершенствование методов теплового проектирования.

В работах авторов и их коллег [5 – 24] показано, что для получения достоверных результатов моделирования тепловых режимов РККК необходимо учитывать нестационарный характер теплообмена и взаимодействие двух механизмов теплообмена – теплопроводности и излучения. Еще один важный вывод заключается в отсутствии в справочной литературе надежных данных по теплофизическим и оптическим характеристикам КМ и необходимости создания методик их определения с использованием натуральных элементов конструкций.

В докладе раскрываются подходы к моделированию тепловых режимов ряда ракетно-космических конструкций, таких как крупногабаритная трансформируемая ловушка космического мусора, рефлекторы зеркальных космических антенн и теплозащитные покрытия многогоразовых КА нового поколения. Рассмотрены методики определения теплофизических характеристик КМ на образцах в виде пластин, полых стержней и полимерных тросов. Теоретическую основу этих подходов составляют методы решения обратных задач радиационно-кондуктивного теплообмена.

Список литературы

1. Материалы и покрытия в экстремальных условиях. Взгляд в будущее. В 3 т. / под ред. С. В. Резника. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – Т. 1, 2.
2. Reznik, S. Yuri Gagarin flight and the composite materials and technologies development // Proc. 1-st Int. Workshop on Advanced Composite Materials and Technologies for Aerospace Applications (May 9 – 11, 2011, Wrexham, UK). – 2011. – P. 11 – 21.
3. Резник, С. В. Термостойкие композиционные материалы и их применение в многоразовых объектах ракетно-космической техники / С. В. Резник, К. В. Михайловский, С. О. Юрченко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. – 58 с.
4. Основы идентификации и проектирования тепловых процессов и систем: учебное пособие / О. М. Алифанов и др. – М.: Логос, 2001. – 400 с.
5. Просунцов, П. В. Определение теплофизических свойств полупрозрачных материалов / П. В. Просунцов, С. В. Резник // Инженерно-физический журнал. – 1985. – Т. 49, № 6. – С. 971 – 976.
6. Просунцов, П. В. Использование моделей комбинированного теплопереноса для анализа температурного состояния элементов тепловой защиты многоразовых космических аппаратов / П. В. Просунцов, И. А. Майорова, А. В. Зуев // Тепловые процессы в технике. – 2014. – № 7. – С. 317 – 323.
7. Prosuntsov, P. V. Parametric identification of thermophysical properties of highly porous partially transparent materials based on the solution of a two-dimensional problem of radiative-conductive heat transfer / P. V. Prosuntsov // Heat Transfer Research. – 2005. – V. 36, N 6. – P. 481 – 499.
8. Просунцов, П. В. Проблемы теплопереноса в частично прозрачных рассеивающих материалах / П. В. Просунцов, С. В. Резник // Ч. 1. Теоретические основы абсолютного стационарного метода определения теплопроводности // Сиб. физико-технический журнал. – 1991. – № 1. С. 51 – 56.
9. Просунцов, П. В. Проблемы теплопереноса в частично прозрачных рассеивающих материалах / П. В. Просунцов, С. В. Резник, В. Е. Тютюнник // Ч. 2. Экспериментальная установка и результаты исследования теплопроводности абсолютным стационарным методом // Сиб. физико-технический журнал. – 1992. – № 4. – С. 27 – 32.
10. Просунцов, П. В. Проблемы теплопереноса в частично прозрачных рассеивающих материалах / П. В. Просунцов, С. В. Резник // Ч. 3. Теоретические основы определения теплопроводности методом монотонного нагрева // Сиб. физико-технический журнал. – 1992. – № 4. С. 33 – 38.
11. Method and results of investigations of thermophysical properties of carbon-polymer composites with full-scale samples of beam space structures / S. V. Reznik, P. V. Prosuntsov, V. S. Railyan, A. V. Shulyakovsky // Proc. 2-nd Int. Symp. on Inverse Problems, Design and Optimization (April 16 – 18, 2007, Miami, FL, USA). – 2017.

12. Reznik, S. V. Features of Inverse Methods for Determination of Heat Transfer in Porous Materials at High Heating Velocity / S. V. Reznik, P. V. Prosuntsov, A. V. Zuev // Proc. 2-nd Int. Symp. on Inverse Problems, Design and Optimization (April 16 – 18, 2007, Miami, FL, USA). – 2007. – P. 493 – 500.

13. Резник, С. В. Оптимальное проектирование крыла суборбитального многоразового космического аппарата из гибридного полимерного композиционного материала / С. В. Резник, П. В. Просунцов, Т. Г. Агеева // Вестник ФГУП НПО им. С. А. Лавочкина. – 2013. – № 1. – С. 38 – 43.

14. Резник, С. В. Актуальные проблемы проектирования, производства и испытания ракетно-космических композитных конструкций / С. В. Резник // Инженерный журнал: Наука и инновации. – 2013. – Вып. #3(15). – 16 с. – URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/638.html>

15. Расчетно-экспериментальное определение теплопроводности углепластика в плоскости армирования на основе бесконтактного измерения температуры / С. В. Резник, П. В. Просунцов, О. В. Денисов, Н. М. Петров, А. В. Шуляковский, Л. В. Денисова // Тепловые процессы в технике. – 2016. – Т. 8, № 12. – С. 557 – 563.

16. Thermal-vacuum tests of hollow composite rods intended for structures in space / S. V. Reznik, V. P. Timoshenko, A. V. Shulyakovsky, O. V. Denisov // Polymer Science. Series D. – 2013. – V. 6, N 3. – P. 242 – 245.

17. Теоретические основы определения продольной теплопроводности тонкостенных элементов конструкций из композиционных материалов / С. В. Резник, В. П. Тимошенко, П. В. Просунцов, Л. В. Мияль // Инженерно-физический журнал. – 2014. – Т. 87, № 4. – С. 838 – 844.

18. Резник, С. В. Обоснование конструктивно-компоновочной схемы рефлектора зеркальной космической антенны с высокой стабильностью формы и малой погонной плотностью / С. В. Резник, П. В. Просунцов, А. В. Азаров // Инженерно-физический журнал. – 2015. – Т. 88, № 3. – С. 674 – 680.

19. Резник, С. В. Прогнозирование теплофизических и термомеханических характеристик пористых углерод-керамических композиционных материалов тепловой защиты аэрокосмических летательных аппаратов / С. В. Резник, П. В. Просунцов, К. В. Михайловский // Инженерно-физический журнал. – 2015. – Т. 88, № 3. – С. 577 – 583.

20. Резник, С. В. Моделирование температурного и напряженно-деформированного состояний рефлектора зеркальной космической антенны / С. В. Резник, П. В. Просунцов, А. В. Азаров // Инженерно-физический журнал. – 2015. – Т. 88, № 4. – С. 945 – 950.

21. Material science problems of building space antennas with a transformable reflector 100 m in diameter / S. V. Reznik, P. V. Prosuntsov, K. V. Mikhailovsky, I. R. Shafikova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – V. 153, N 1. 012012.10 p.

22. Aung Study variants of hard CFRP reflector for intersatellite communication / P. V. Prosuntsov, S. V. Reznik, K. V. Mikhailovsky, A. D. Novikov, Zaw Ye //

IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – V. 153, N 1. 012012.7 p.

23. Reznik, S. V. Comparative analysis of the honeycomb and thin-shell space antenna reflectors / S. V. Reznik, A. D. Novikov // MATEC Web of Conferences 01012 (2017) Thermophysical Basis of Energy Technologies. – 2016. – 5 p.

24. Резник, С. В. Теплообмен при газофазном осаждении карбида кремния в пористый углерод-углеродный композиционный материал тепловой защиты / С. В. Резник, К. В. Михайловский, П. В. Просунцов // Инженерно-физический журнал. – 2017. – Т. 90, № 2. – С. 314 – 324.

THERMOPHYSICAL PROBLEMS OF ROCKET-SPACE COMPOSITE STRUCTURES

S. V. Reznik, P. V. Prosuntsov

Bauman Moscow State Technical University

(National Research Institute), Moscow

sreznik@bmstu.ru

Abstract. Space exploration prospects are to a large degree connected with improving technical characteristics of space launch systems and creating increasingly superior spacecraft for various purposes. Composite materials offer enormous advantages for enhancing rocket and space technology. This paper summarises general requirements to the rocket and space composite structures. It emphasizes those features of the composite materials and structures that are essential for the thermal design. A number of examples illustrate the approaches to solving problems in thermal physical design.

Keywords: rocket and space technology, composite materials, radiation-conductive heat transfer, modeling.

НАГРЕВ НИСХОДЯЩЕГО ПОТОКА СУСПЕНЗИИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ВЕРТИКАЛЬНОМ КАНАЛЕ ПРИ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ВТОРОГО РОДА НА СМОЧЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

А. В. Ряжских, И. Н. Качкин

*ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет», Воронеж*

Аннотация. С помощью геометрического осреднения линеаризованных уравнений взаимопроникающего континуума для двухфазных сред в предположении однонаправленности течения в режиме идеального вытеснения получено аналитическое решение задачи идентификации температур фаз в аксиальном направлении нисходящего потока в вертикальном цилиндрическом канале при граничных условиях второго рода.

Ключевые слова: двухфазная среда, суспензия, тепловой поток, нисходящее течение, цилиндрический канал.

Задача идентификации количественного присутствия дисперсной составляющей в движущихся двухфазных средах, в частности, в суспензиях, индиферентных к изменению температуры (без фазовых переходов), в научной литературе практически отсутствует [1]. В данном случае речь идет о предварительном нагреве участка транспортирующего суспензию канала с последующим анализом температурного отклика для нисходящего потока в цилиндрической вертикальной геометрии. В формате 2D предполагается осевая симметрия, однонаправленность потока, отсутствие образования осадка на смоченной поверхности и переструктуризации топологии дисперсной фазы ввиду малого времени пребывания. Диссипацией механической энергии и фазовыми переходами пренебрегают. Теплофизические характеристики фаз суспензии считаются постоянными.

Синтез математической модели базируется на основе классических уравнений взаимопроникающего континуума для двухфазных сред [2]:

$$\frac{\partial T_f}{\partial Z} = Pe_f^{-1} \left(\frac{\partial^2 T_f}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T_f}{\partial R} \right) + \frac{Nu_f}{Pe_f} \varphi \xi^2 (\Lambda T_s - T_f); \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial Z} = Pe_s^{-1} \left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T_s}{\partial R} \right) + \frac{Nu_f}{Pe_s} \xi^2 (T_f - \Lambda T_s); \quad (2)$$

$$T_f(R, 0) = T_s(R, 0) = 0; \quad (3)$$

$$\frac{\partial T_f(0, Z)}{\partial R} = 0; \quad \frac{\partial T_s(0, Z)}{\partial R} = 0; \quad (4)$$

$$\frac{\partial T_f(1, Z)}{\partial R} = 1; \quad \frac{\partial T_s(1, Z)}{\partial R} = 0, \quad (5)$$

где Z, R – безразмерные аксиальная и радиальная координаты, отнесенные к радиусу канала; T_f, T_s – относительные температуры жидкой среды и частиц суспензии; Pe_f, Pe_s – числа Пекле для дисперсионной и дисперсной фаз; Nu_f – локальное число Нуссельта на границе жидкость–частица; ξ – отношение радиуса канала к характерному размеру частиц; Λ – отношение теплопроводностей фаз суспензии; φ – отношение объемных долей фаз.

Процедура осреднения системы (1) – (5) по координате R дает

$$\frac{d\bar{T}_f}{dZ} = Pe_f^{-1} + \frac{Nu_f}{Pe_f} \varphi \xi^2 (\Lambda \bar{T}_s - \bar{T}_f); \quad (6)$$

$$\frac{d\bar{T}_s}{dZ} = \frac{Nu_f}{Pe_f} \xi^2 (\bar{T}_f - \Lambda \bar{T}_s); \quad (7)$$

$$\bar{T}_f(0) = \bar{T}_s(0) = 0, \quad (8)$$

где

$$\bar{T}_f = 2 \int_0^1 R T_f dR; \quad \bar{T}_s = 2 \int_0^1 R T_s dR.$$

Интегрирование системы (6) – (8) с помощью одностороннего преобразования Лапласа [3] приводит к решению:

$$\begin{aligned} \bar{T}_s(Z) = & \frac{Pe_f^{-1}}{\Lambda + \varphi Pe_s / Pe_f} \left\langle Z - \frac{Pe_s}{Nu_f \xi^2 (\Lambda + \varphi Pe_s / Pe_f)} \times \right. \\ & \left. \times \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{Nu_f \xi^2}{Pe_s} \left(\Lambda + \varphi \frac{Pe_s}{Pe_f} \right) \right] \right\} \right\rangle; \quad (9) \end{aligned}$$

$$\bar{T}_f(Z) = \frac{Pe_s Pe_f^{-1}}{Nu_f \xi^2 \left(\Lambda + \varphi \frac{Pe_s}{Pe_f} \right)} \left\langle \frac{Nu_f}{Pe_s} \xi^2 \Lambda Z - \left[\frac{\Lambda / Pe_s - \Lambda - \varphi Pe_s / Pe_f}{(\Lambda + \varphi Pe_s / Pe_f) / Pe_s} \right] \times \right. \\ \left. \times \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{Nu_f \xi^2}{Pe_s} \left(\Lambda + \varphi \frac{Pe_s}{Pe_f} \right) Z \right] \right\} \right\rangle \quad (10)$$

Практическим приложением полученного результата может быть, например, реализация теплового контроля за содержанием дисперсной фазы в суспензии.

Список литературы

1. Нестерук, Д. А. Тепловой контроль и диагностика / Д. А. Нестерук, В. П. Вавилов. – Томск: ТПУ, 2007. – 104 с.
2. Островский, Г. М. Прикладная механика неоднородных сред / Г. М. Островский. – СПб.: Наука, 2000. – 359 с.
3. Деч, Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и z-преобразования / Г. Деч. – М.: Наука, 1971. – 288 с.

HEATING OF THE DOWNWARD FLOW OF THE SUSPENSION IN A CYLINDRICAL VERTICAL CHANNEL UNDER BOUNDARY CONDITIONS OF THE SECOND KIND ON THE WETTED SURFACE

A. V. Ryazhskih, I. N. Kachkin

Voronezh State Technical University, Voronezh

Abstract. By means of geometric averaging of the linearized equations of the interpenetrating continuum for two-phase media under the assumption of unidirectional flow in the regime of ideal displacement, an analytical solution to the problem of phase temperature identification in the axial direction of the downward flow in the vertical cylindrical channel under boundary conditions of the second kind is obtained.

Keywords: two-phase medium, suspension, heat flow, downward flow, a cylindrical channel.

ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТОНКИХ СЛОИСТЫХ СТРУКТУР И ИХ ПОЛУЧЕНИЯ

К. Б. Саидзода¹, М. М. Сафаров²

¹*Технологический университет Таджикистана, Душанбе*

²*Филиал МГУ имени М. В. Ломоносова в г. Душанбе, Таджикистан
mahmad1@list.ru*

Аннотация. Приведена методика получения тонких слоистых структур, т.е. сложных оксидных материалов. Для получения тонких слоистых материалов использован метод испарения. Разогрев испаряемого вещества до температуры, при которых оно интенсивно испаряется, осуществляют электронным или лазерным лучом, СВЧ-излучением, с помощью резистивных подогревателей (путем непосредственного пропускания электрического тока через образец из нужного вещества или теплопередачей от нагретой спирали). В целом метод отличается большим разнообразием как по способам разогрева испаряемого вещества, так и по конструкциям испарителей.

Ключевые слова: тонкие слоистые структуры, магнитные и электрические свойства, мульти-ферроид, термическое испарение, испаритель.

Тонкие пленки – это слои вещества толщиной от долей нанометра до нескольких микрометров, обладающие рядом особенностей атомно-кристаллической структуры, магнитных, электрических и других физических свойств.

Термическое испарение. Этот метод получения тонких пленок основан на нагреве в вакууме вещества до его активного испарения и конденсации испаренных атомов на поверхности подложки. К достоинствам метода осаждения тонких пленок термическим испарением относятся высокая чистота осаждаемого материала (процесс проводится при высоком и сверхвысоком вакууме), универсальность (наносит пленки металлов, сплавов, полупроводников, диэлектриков) и относительная простота реализации. Ограничениями метода являются нерегулируемая скорость осаждения, низкая, непостоянная и нерегулируемая энергия осаждаемых частиц. Упрощенная схема вакуумной установки для получения тонких пленок путем термического испарения представлена на рис. 1. Вещество, подлежащее напылению, помещают в устройство нагрева (испаритель) 1, где оно при достаточно высокой температуре интенсивно испаряется. В вакууме, который создается внутри камеры специальными насосами, молекулы испаренного вещества свободно и быстро распространяются в окружающее пространство, достигая, в частности, поверхности подложки 2 [1 – 3].

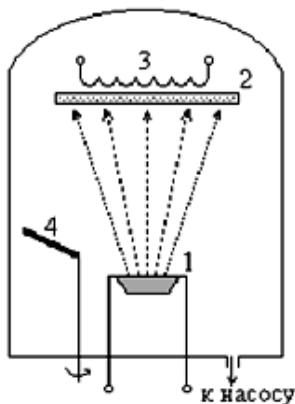


Рис. 1. Схема установки термического испарения

В зависимости от функционального назначения пленки в процессе осаждения контролируется время напыления, толщина, электрическое сопротивление или какой-либо другой параметр. По достижении заданного значения параметра заслонка вновь перекрывает поток вещества и процесс роста пленки прекращается. Нагрев подложки с помощью нагревателя 3 перед напылением способствует десорбции адсорбированных на ее поверхности атомов, а в процессе осаждения создает условия для улучшения структуры растущей пленки. Непрерывно работающая система откачки поддерживает вакуум порядка 10^{-4} Па. Разогрев испаряемого вещества до температур, при которых оно интенсивно испаряется, осуществляют электронным или лазерным лучом, СВЧ-излучением, с помощью резистивных подогревателей (путем непосредственного пропускания электрического тока через образец из нужного вещества или теплопередачей от нагретой спирали). В целом метод отличается большим разнообразием как по способам разогрева испаряемого вещества, так и по конструкциям испарителей. Если требуется получить пленку из многокомпонентного вещества, то используют несколько испарителей. Поскольку скорости испарения у различных компонентов разные, то обеспечить воспроизводимость химического состава получаемых многокомпонентных пленок довольно сложно. Поэтому метод термовакuumного напыления используют в основном для чистых металлов. Весь процесс термовакuumного напыления можно разбить на три стадии: испарение атомов вещества, перенос их к подложке и конденсация. Испарение вещества с поверхности имеет место, вообще говоря, при любой температуре, отличной

от абсолютного нуля. Если допустить, что процесс испарения молекул (атомов) вещества протекает в камере, стенки которой достаточно сильно нагреты и не конденсируют пар (отражают молекулы), то процесс испарения становится равновесным, т.е. число молекул, покидающих поверхность вещества, равно числу молекул, возвращающихся в вещество. Давление пара, соответствующее равновесному состоянию системы, называется давлением насыщенного пара, или его упругостью. Практика показывает, что процесс осаждения пленок на подложку происходит с приемлемой для производства скоростью, если давление насыщенного пара примерно равно 1,3 Па. Температура вещества, при которой $p_{\text{и}} = 1,3 \text{ Па}$ ($p_{\text{и}}$ – давление насыщенного пара при температуре испарения), называют условной температурой $T_{\text{усл}}$. Для некоторых веществ условная температура выше температуры плавления $T_{\text{пл}}$, для некоторых – ниже. Если $T_{\text{усл}} < T_{\text{пл}}$, то это вещество можно интенсивно испарять из твердой фазы (возгонкой). В противном случае испарение осуществляют из жидкой фазы. Зависимости давления насыщенного пара от температуры для всех веществ, используемых для напыления тонких пленок, представлены в различных справочниках в форме подробных таблиц или графиков. Вторая стадия процесса напыления тонких пленок – перенос молекул вещества от испарителя к подложке. Если обеспечить прямолинейное и направленное движение молекул к подложке, то можно получить высокий коэффициент использования материала, что особенно важно при осаждении дорогостоящих материалов. При прочих равных условиях это повышает также и скорость роста пленки на подложке. По мере испарения вещества интенсивность потока и диаграмма направленности для большинства типов испарителей постепенно меняются. В этих условиях последовательная обработка неподвижных подложек приводит к разбросу в значениях параметров пленки в пределах партии, обработанной за один вакуумный цикл. Для повышения воспроизводимости подложки устанавливаются на вращающийся диск-карусель. При вращении карусели подложки поочередно и многократно проходят над испарителем, за счет чего нивелируются условия осаждения для каждой подложки и устраняется влияние временной нестабильности испарителя. Третьей стадией процесса напыления тонких пленок является стадия конденсации атомов и молекул вещества на поверхности подложки. Эту стадию условно можно разбить на два этапа: начальный этап – от момента адсорбции первых атомов (молекул) на подложку до момента образования сплошного покрытия, и завершающий этап, на котором происходит гомогенный рост пленки до заданной толщины.

Список литературы

1. Херман, М. Полупроводниковые сверхрешетки / М. Херман; пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 240 с.
2. Федосюк, В. М. Многослойные магнитные структуры / В. М. Федосюк, М. У. Шелег, О. И. Касютин // Зарубежная радиоэлектроника. – 1990. – № 5. – С. 88 – 97.
3. Фельдман, Л. Основы анализа поверхности и тонких пленок / Л. Фельдман, Д. Майер. – М.: Мир, 1989. – 344 с.

TECHNOLOGY OF FORMATION OF THIN LAYERED STRUCTURES AND THEIR PRODUCTION

K. B. Saidzoda¹, M. M. Safarov²

¹Technological University of Tajikistan, Dushanbe

*²BMDU named after M. V. Lomonosov in Dushanbe, Tajikistan
mahmad1@list.ru*

Abstract. The paper gives a procedure for obtaining thin layered structures, i.e. complex oxide materials. To obtain thin laminates, the evaporation method was used. The heating of the evaporated substance to temperatures at which it evaporates intensively is carried out electronically or laser beam, microwave radiation, with the help of resistive heaters (by directly passing an electric current through a sample from the desired substance or by heat transfer from a heated spiral). In general, the method is very diverse both in terms of the methods of heating up the evaporated substance and in the constructions of the evaporators.

Keywords: thin layered structures, magnetic and electrical properties, multiferroic, thermal evaporation, evaporator.

**ПРИБЛИЖЕННОЕ АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ
ЗАДАЧИ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ
В ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПОЛОСТИ
ПРИ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ВТОРОГО РОДА**

В. А. Сумин¹, В. И. Рязских²

¹*Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского
и Ю. А. Гагарина», Воронеж*

²*ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет», Воронеж
vsum@rambler.ru*

Аннотация. Рассмотрена задача ламинарной термоконвекции вязкой несжимаемой жидкости в прямоугольной области с постановкой тепловых граничных условий второго рода.

Ключевые слова: функция тока, уравнения Стокса, теплопроводность, аналитическое решение, свободноконвективное течение.

Рассмотрена задача ламинарной термоконвекции вязкой несжимаемой жидкости в прямоугольной области с постановкой тепловых граничных условий второго рода [1]. Уравнения Обербека–Буссинеска в приближении Стокса для гидродинамической подзадачи имеют следующий вид [2]:

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} \right) = \frac{\partial^4 \Psi}{\partial X^4} + 2 \frac{\partial^4 \Psi}{\partial X^2 \partial Y^2} + \frac{\partial^4 \Psi}{\partial Y^4} - \text{Gr} \frac{\partial T}{\partial X}; \quad (1)$$

$$\Psi(X, Y, 0) = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Psi(0, Y, \theta)}{\partial X} = \frac{\partial \Psi(c, Y, \theta)}{\partial X} = \frac{\partial \Psi(X, 0, \theta)}{\partial Y} = \frac{\partial^2 \Psi(X, b, \theta)}{\partial Y^2} = 0; \quad (3)$$

$$\Psi(0, Y, \theta) = \Psi(c, Y, \theta) = \Psi(X, 0, \theta) = \Psi(X, b, \theta) = 0; \quad (4)$$

$$\frac{\partial T(X, Y, \theta)}{\partial \theta} = \frac{1}{\text{Pr}} \left[\frac{\partial^2 T(X, Y, \theta)}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T(X, Y, \theta)}{\partial Y^2} \right]; \quad (5)$$

$$T(X, Y, 0) = 0; \quad (6)$$

$$\frac{\partial T(0, Y, \theta)}{\partial X} = -1; \quad \frac{\partial T(c, Y, \theta)}{\partial X} = 1; \quad (7)$$

$$\frac{\partial T(X, 0, \theta)}{\partial Y} = -1; \quad \frac{\partial T(X, b, \theta)}{\partial Y} = 0, \quad (8)$$

где $X = \frac{x}{l}$, $Y = \frac{y}{l}$, $\theta = \frac{tv}{l^2}$, $\zeta = \frac{h_1}{h_2}$, $T = \frac{t\lambda}{ql}$, $Gr = \frac{\beta g q l^4}{v^2 \lambda}$, $l = \frac{2h_1 h_2}{h_1 + h_2}$,
 Ψ – безразмерная функция тока; x, y – декартовы координаты;
 t – время; h_1, h_2 – ширина и высота области; t – локальная температура;
 β, λ, γ – коэффициент температурного расширения; теплопроводности и кинематической вязкости среды; q – плотность теплового потока через смоченную границу области; g – вектор ускорения силы тяжести; $c = \frac{\zeta+1}{2}$, $b = \frac{\zeta+1}{2\zeta}$.

Учитывая полусопряженный характер системы (1) – (8), вначале автономно решена тепловая подзадача (5) – (8), обобщенный вид которой

$$T(X, Y, \theta) = \Lambda(X, Y, \theta) + \frac{2}{\zeta+1} X^2 - X + \frac{1}{2} (Y-1)^2 - \frac{\zeta-1}{\zeta+1} (1-Y) e^{Y-b}, \quad (9)$$

где функция $\Lambda(X, Y, \theta)$ структурно представляет собой двойные ряды Фурье.

Затем, подставляя выражение (9) в (1), решена гидродинамическая подзадача (1) – (4) с использованием двукратного конечного интегрального косинус-преобразования Фурье по геометрическим координатам со специально сконструированными коэффициентами разложения L_j , Q_j и F_i , которые определяются из специально сформулированной бесконечной системы линейных уравнений по граничным условиям (3) и (4):

$$\Psi(X, Y, \theta) = 4 \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{p_i^2 + \eta_j^2} \left[p_i (\cos(p_i a) L_j - Q_j) M(p_i, \eta_j, \theta) - \right. \\ \left. - \eta_j F_i N(p_i, \eta_j, \theta) + e^{-(p_i^2 + \eta_j^2)\theta} \int_0^\theta \Phi(\theta) e^{(p_i^2 + \eta_j^2)\theta} d\theta \right] \sin(p_i X) \sin(\eta_j Y), \quad (10)$$

где

$$M(p_i, \eta_j, \theta) = \frac{1 - e^{-(p_i^2 + \eta_j^2)\theta}}{p_i^2 + \eta_j^2} - \frac{e^{-\eta_j^2\theta} - e^{-(p_i^2 + \eta_j^2)\theta}}{p_i^2};$$

$$N(p_i, \eta_j, \theta) = \frac{1 - e^{-(p_i^2 + \eta_j^2)\theta}}{p_i^2 + \eta_j^2} - \frac{e^{-p_i^2\theta} - e^{-(p_i^2 + \eta_j^2)\theta}}{\eta_j^2};$$

$$\sin(p_i a) = 0; \quad \sin(\eta_j b) = 0.$$

Вычислительный эксперимент (рис. 1) показал, что качественно картина свободно конвективного течения в прямоугольной области физична, т.е. теплая жидкость поднимается по вертикальным стенам и затем опускается по центру ко дну. Причем интенсивность такой циркуляции возрастает, так как теплота аккумулируется в рассматриваемой области. Количественно полученные результаты коррелируют с результатами в работе [3].

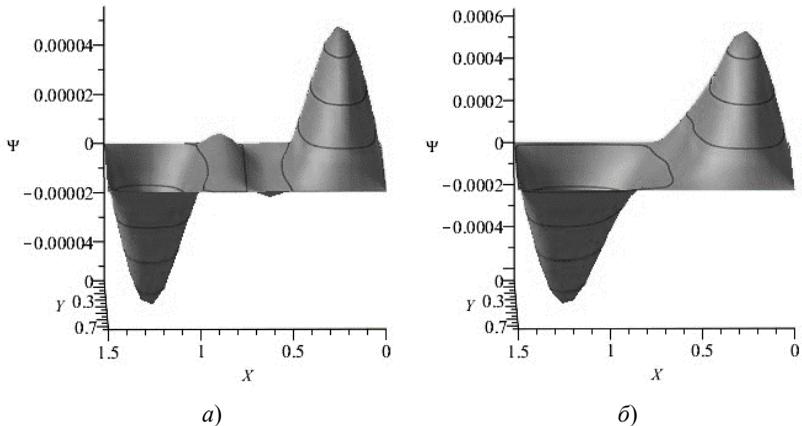


Рис. 1. Pr = 1,01, Gr = 1 для:
 а – $\theta = 0,001, \xi = 2$; б – $\theta = 0,05, \xi = 2$

Список литературы

- 1 Ben-Cheikh, N. Influence of thermal boundary conditions on natural convection in a square enclosure partially heated from below / N. Ben-Cheikh, B. Ben-Beya, T. Lili // *Int. Commun. Heat Mass Transfer.* – 2007. – N 34. – P. 369 – 379.
- 2 Хаппель, Дж. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса / Дж. Хаппель, Г. Бреннер – М.: Мир, 1976. – 630 с.
- 3 Mobedi, M. Visualization of diffusion and convection heat transport in a square cavity with natural convection / M. Mobedi, U. Ozkol, B. Sunden // *Int. J. Heat Mass Transfer.* – 2010. – N 53. – P. 99 – 109.

APPROXIMATE ANALYTICAL SOLUTION OF THE FREE CONVECTION PROBLEM IN A RECTANGULAR REGION UNDER BOUNDARY CONDITIONS OF THE SECOND KIND

V. A. Sumin¹, V. I. Ryazhskih²

*¹Military Educational and Scientific Center of the Air Force
“N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy”, Voronezh*

*²Voronezh State Technical University, Voronezh
vsum@rambler.ru*

Abstract. The problem of laminar thermal convection of a viscous incompressible fluid in a rectangular region with the statement of thermal boundary conditions of the vorticity genus is considered.

Keywords: stream function, Stokes equations, thermal conductivity, analytical solution, free convection flow over.

ПРИМЕНЕНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОЖИДКОСТЕЙ

Д. В. Таров, А. Д. Али-Шариф
ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный
технический университет», Тамбов
tugolukoven@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена возможность интенсификации теплоотдачи от жидких теплоносителей путем изменения их теплофизических характеристик (преимущественно теплопроводности) при введении нанокремниевых материалов в жидкие теплоносители.

Ключевые слова: теплопроводность, наномодифицированный теплоноситель, углеродные нанотрубки.

Одним из методов интенсификации теплообменных процессов является применение эффективных теплоносителей. Для применения в тепловых и других практических приложениях перспективными могут быть теплоносители, модифицированные наноразмерными (1...100 нм) частицами, так называемые наножидкости. Такие нанодисперсные системы привлекают внимание за счет проявления специфических свойств: высокая седиментационная устойчивость, уменьшение коррозионно-эрозивного воздействия на поверхности, «аномального» увеличения теплопроводности, увеличения значений критических тепловых потоков. Существует, по крайней мере, четыре механизма, объясняющих «аномальное» поведение наножидкостей [1 – 3]:

- броуновское движение и микроконвекция вокруг наночастиц;
- упорядочение слоев жидкости вокруг наночастиц, действующих как тепловой мост;
- баллистический перенос тепла в наночастицах;
- кластеризация наночастиц и перколяционных цепочек с более низким термическим сопротивлением.

Наножидкость создают путем модифицирования [2, 3], т.е. ввода в нее наночастиц, в результате чего она приобретает свойство отводить тепло лучше, чем обычные теплоносители. Например, если используется для охлаждения электронного оборудования вода, то добавление наночастиц меди позволяет получить наножидкость, которая будет отводить тепло на 30...40% лучше, чем чистая вода.

Существующие методы получения наножидкостей можно разделить на две группы модифицирования: физические и химические.

В первом случае происходит образование наночастиц при испарении металлов в среде теплоносителя при вводе энергии в гетерогенную среду. В этом случае достигается высокая дисперсность наножидкостей. Физическое модифицирование реализуется только в лабораторных условиях вследствие высоких требований к исходному теплоносителю (высокая чистота, диэлектрические свойства и т.д.) и к экспериментальной установке. Во втором случае сначала производится синтез наночастиц с последующей их функционализацией. Появляется возможность создания наночастиц с относительно большим количеством поверхностных функциональных групп. В этом случае за счет прivity определенных радикалов к поверхности наночастиц достигается высокая седиментационная устойчивость при введении их в обычные теплоносители. Химическое модифицирование позволяет получать широкий спектр сочетания «теплоноситель – функционализированные наночастицы» для получения наножидкостей с заданными свойствами в промышленных масштабах.

В ТГТУ разработана опытно промышленная технология [4, 5] синтеза углеродных нанотрубок (УНТ) серии «Таунит» газофазным химическим осаждением на катализаторе (Ni/Mg) при атмосферном давлении и температуре 580...650 °С, их характеристики и газофазной или жидкофазной функционализации. В связи с уникальными свойствами углеродные нанотрубки имеют перспективы широкого применения в составе наножидкостей. При получении наножидкостей с УНТ важным является выбор эффективного способа введения их в теплоноситель и оптимизация технологических режимов его получения. Производство данных систем требует контролируемого смешивания, стабилизации полученного распределения наночастиц, а также ориентации дисперсной фазы. Одной из наиболее важных проблем, возникающих при получении наномодифицированных теплоносителей, является необходимость однородного распределения наночастиц в материале матрицы.

Список литературы

1. Бардаханов, С. П. Исследование теплопроводности наножидкостей на основе наночастиц оксида алюминия / С. П. Бардаханов, С. А. Новопашин, М. А. Серебрякова // Наносистемы: физика, химия, математика. – 2012. – Т. 3, № 1. – С. 27 – 33.
2. Ramest, G. Review of thermo-physical properties, wetting and heat transfer characteristics of nanofluids and their applicability in industrial quench heat treatment / G. Ramest, N. K. Prabhu // Nanoscale Review Letters. – 2011. – Apr 14; V. 6, 1. – P. 334 – 349.

3. Наножидкости для энергетики: влияние стабилизации на критический тепловой поток при кипении / Б. И. Бондаренко, В. Н. Морару, С. В. Сидоренко и др. // Письма в ЖТФ. – 2012. – Т. 38, № 18. – С. 68 – 78.
4. Ткачев, А. Г. Аппаратура и методы синтеза твердотельных наноструктур / А. Г. Ткачев. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 170 с.
5. Дьячкова, Т. П. Методы функционализации и модифицирования углеродных нанотрубок / Т. П. Дьячкова, А. Г. Ткачев. – М.: Издательский дом «Спектр», 2013. – 152 с.

APPLICATION OF CARBON NANOTUBES FOR THE PRODUCTION OF NANOID FLUIDS

D. V. Tarov, A. J. Ali-Sharif

*Tambov State Technical University, Tambov
tugolukoven@mail.ru*

Abstract. The possibility of intensification of heat transfer from liquid heat carriers by changing their thermophysical characteristics (mainly thermal conductivity) when introducing nanocarbon materials into liquid heat carriers is considered.

Keywords: heat conductivity, nanomodified coolant, carbon nanotubes.

ВЛИЯНИЕ НЕНЬЮТОНОВСКИХ СВОЙСТВ НА ТЕЧЕНИЕ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В Т-БИФУРКАЦИЯХ НА ПРИМЕРЕ ЦЕРЕБРАЛЬНЫХ АРТЕРИЙ

С. В. Фролов, С. В. Синдеев
*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный
технический университет», Тамбов*

Аннотация. Исследован кровоток в Т-бифуркации церебральной артерии при высокой степени стеноза с использованием неньютоновских моделей крови и при различных соотношениях потоков в бифуркации. Наибольшие различия между ньютоновской и неньютоновской моделями жидкости были обнаружены в области рециркуляции кровотока.

Ключевые слова: математическое моделирование, неньютоновская жидкость, гемодинамика.

Несколько численных и экспериментальных исследований показали, что гемодинамика играет важную роль в генезе различных нарушений мозгового кровообращения [1, 2]. Поэтому важную роль в диагностике и лечении играет оценка гемодинамических характеристик в церебральных артериях [3]. Хотя большинство численных исследований гемодинамики в церебральных артериях проводится с использованием ньютоновской модели крови, неньютоновские свойства крови могут значительно изменить распределение гемодинамических параметров в областях с низкой скоростью сдвига, характеризующихся нелинейной зависимостью вязкости крови от скорости сдвига. Это особенно важно учитывать при исследовании бифуркации церебральных артерий со стенозом высокой степени, где присутствуют зоны стагнации.

Как правило, атеросклероз образуется в бифуркации или в изгибе церебральной артерии, где возникают специфичные параметры кровотока [3]. Однако использование ньютоновской модели может привести к переоценке гемодинамических параметров.

В представленной работе исследован кровоток в Т-бифуркации церебральной артерии при высокой степени стеноза с использованием неньютоновских моделей крови и при различных соотношениях потоков в бифуркации.

Материалы и методы

Идеализированная модель бифуркации. Для проведения численных исследований была использована трехмерная модель идеализиро-

ванной Т-бифуркации церебральной артерии. Угол бифуркации равен 90 градусам. Соединение родительской артерии и ветви имеет острые углы. Диаметр входного и выходного сегментов родительской артерии равны 3,06 мм, а диаметр ветви – 1,98 мм. Входной и выходной сегмент имеют длину 100 мм. Длина ветви – 100 мм.

Кровоток в церебральной артерии. Вязкость крови принималась равной 1050 кг/м³. На входе бифуркации была использована реалистичная зависимость входного потока от времени. Средняя за сердечный цикл входная скорость крови равнялась 265 мм/с, что соответствует объемному кровотоку в 7 л/ч характерному для церебральных артерий. Для моделирования различных степеней стеноза соотношение кровотоков между родительской артерией и ветвью было задано равным 0,7 и 0,9 с помощью настройки давления в выходном сегменте родительской артерии.

Для сравнения результатов моделирования с использованием ньютоновской и неньютоновской модели жидкости безразмерные величины (число Рейнольдса и число Струхала) были в обоих моделируемых случаях одинаковыми. При расчете числа Рейнольдса для неньютоновской жидкости использовалась репрезентативная вязкость [1].

Свойства жидкости. Для численного моделирования были выбраны наиболее распространенные модели неньютоновской жидкости. Ньютоновская модель описывает кровь как жидкость с постоянной вязкостью:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta, \quad (1)$$

где η – динамическая вязкость; $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига. В работе была использована вязкость крови $\eta = 3,5$ мПа·с.

Модель Power Law:

$$\eta(\dot{\gamma}) = k\dot{\gamma}^{n-1}, \quad (2)$$

где k и n – индексы. Вязкость ограничена минимальным η_{\min} и максимальным η_{\max} значениями соответственно. В работе были использованы следующие параметры: $k = 0,0117642$; $n = 0,8092$; $\eta_{\min} = 3,5$ мПа·с и $\eta_{\max} = 14$ мПа·с.

Модель Bird-Carreau:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_{\min} + (\eta_{\max} - \eta_{\min}) \left[1 + (k\dot{\gamma})^2 \right]^{(n-1)/2}. \quad (3)$$

Параметры модели: $k = 0,6046$; $n = 0,3742$. Значения η_{\min} и η_{\max} такие же, как и для модели Power Law.

Модель Casson:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \left(\sqrt{\tau_y / \dot{\gamma}} + \sqrt{k} \right)^2, \quad (4)$$

где τ_y – напряжение. Параметры модели $\tau_y = 3,6$; $k = 4,11$.

Модель Local viscosity [6]:

$$\eta(\dot{\gamma}) = a_i + b_i(\dot{\gamma} - \dot{\gamma}_i) + c_i(\dot{\gamma} - \dot{\gamma}_i)^2 + d_i(\dot{\gamma} - \dot{\gamma}_i)^3, \quad (5)$$

$$\dot{\gamma} \in [\dot{\gamma}_{i-1}, \dot{\gamma}_i], \quad i = \{1, 2, \dots, S\},$$

где a_i, b_i, c_i, d_i – коэффициенты i -го сплайна. Модель локальной вязкости использует множество кубических сплайнов для точной интерполяции измеренной вязкости крови.

Результаты. Полученные результаты были проанализированы для момента систолического пика. Карта скорости для различных соотношений Q_r представлена на рис. 1 для соотношения 0,7 и на рис. 2 – для соотношения 0,9.

Согласно результатам моделирования, все модели вязкости (1) – (5) определили схожее распределение скорости кровотока. Главный поток разделяется около правой границы ветви, образуя две области циркуляции. Первая область находится около левой границы ветви, тогда как вторая расположена около верхней границы родительской артерии дистально к бифуркации. Область высоких скоростей наблюдается около правой границы ветви за точкой разделения потока.

Особо стоит отметить, что с увеличением соотношения потоков область рециркуляции около левой границы ветви сжимается, тогда как другая зона рециркуляции около верхней границы родительской артерии увеличивается в размере. Также для ньютоновской модели жидкости размер зоны рециркуляции приблизительно в 1,5 раза больше по сравнению с неньютоновскими моделями.

Рассчитанные поля скорости для различных моделей жидкости были использованы для расчета линий тока. Представленные на рис. 3 и 4 линии тока отображают две зоны рециркуляции вблизи области бифуркации. Эти зоны характеризуются низкими значениями скорости. Величина скорости в этих областях около $8,12 \cdot 10^{-5}$ м/с.

Как видно из рисунков, область рециркуляции около левой границы ветви уменьшается с увеличением соотношения потоков, в то время как область около верхней границы родительской артерии увеличивается.

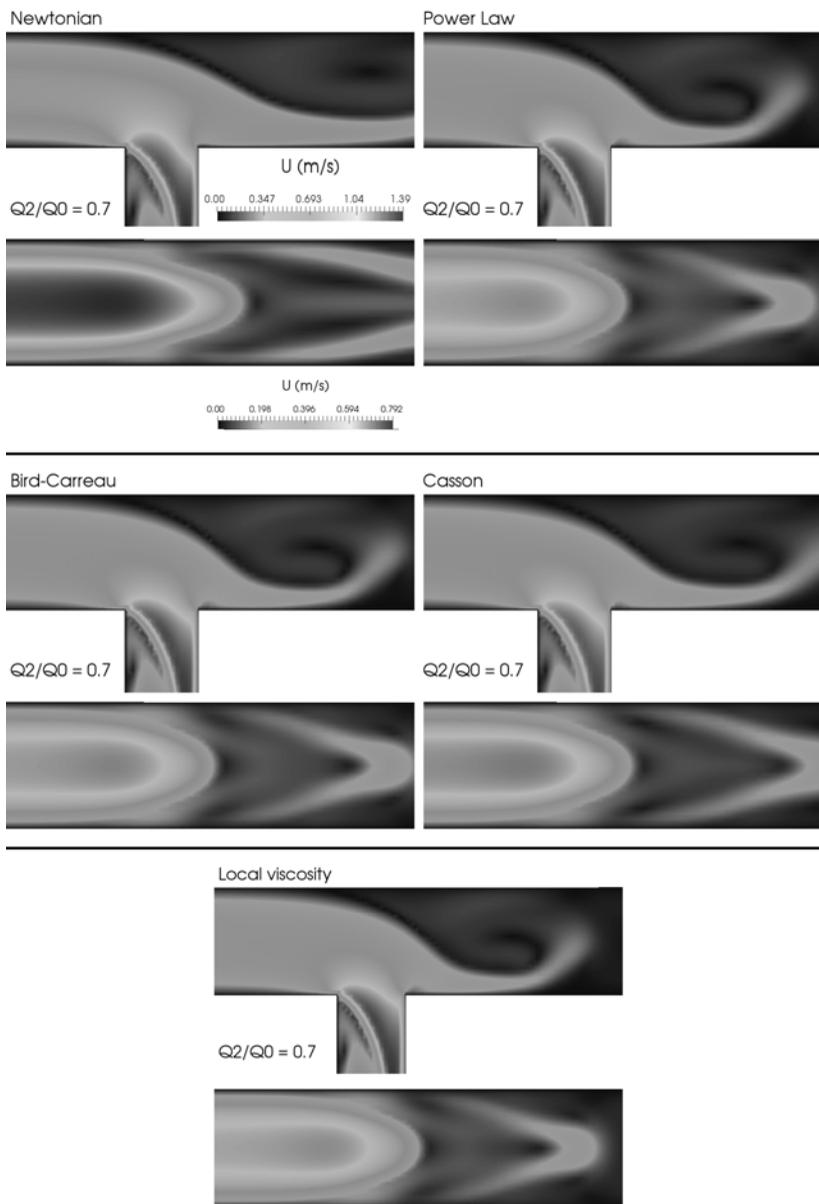


Рис. 1. Распределение скорости в модели бифуркации при соотношении потоков, равном 0,7

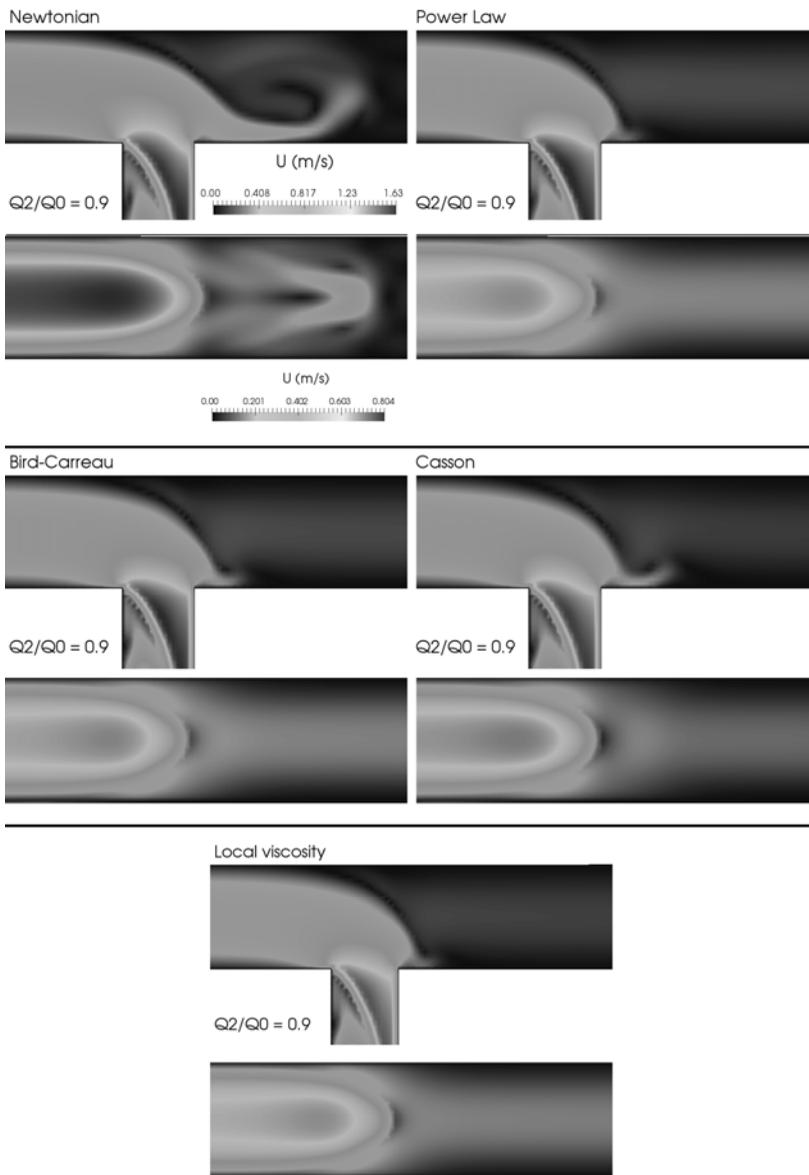


Рис. 2. Распределение скорости в модели бифуркации при соотношении потока, равном 0,9

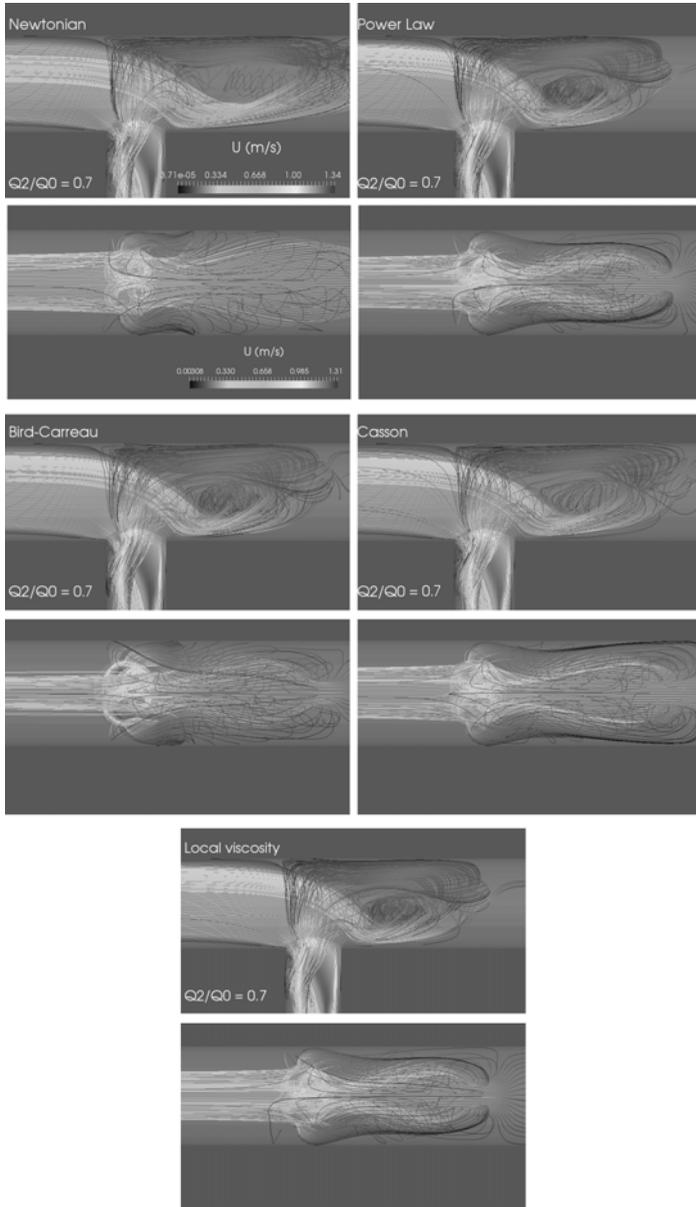


Рис. 3. Линии тока для центрального сечения модели бифуркации при соотношении потоков, равном 0,7

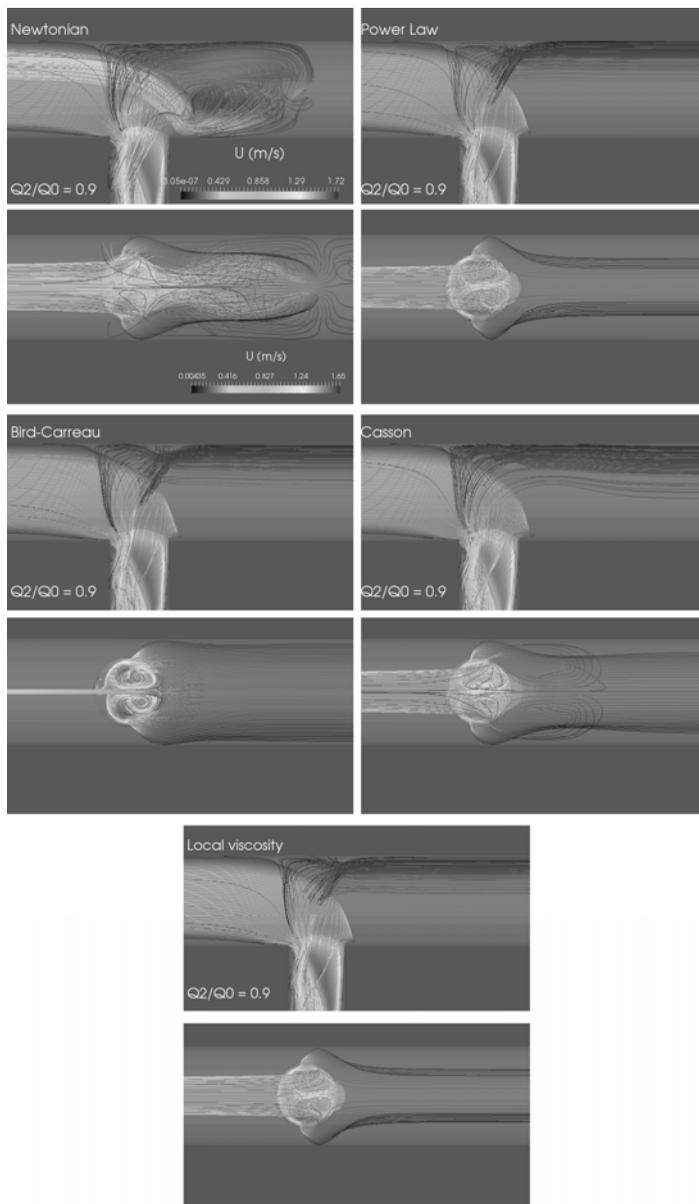


Рис. 4. Линии тока для центрального сечения модели бифуркации при соотношении потоков, равном 0,9

Полученные результаты показывают, что неньютоновские свойства крови имеют значительное влияние на гемодинамические характеристики в рассматриваемых случаях, особенно в зонах рециркуляции и должны быть учтены в дальнейших исследованиях кровотока.

Заключение. Для обеих смоделированных степеней стеноза ньютоновская модель переоценила максимальную скорость в артерии по сравнению с неньютоновскими моделями. С увеличением скорости в сегменте различие между ньютоновской и неньютоновской моделями становится менее значимо. В работе показано, что наибольшие различия наблюдаются в областях циркулирующего потока, где должны учитываться неньютоновские свойства крови.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №16-15-10327).

Список литературы

1. Liepsch, D. W. Flow in tubes and arteries – a comparison / D. Liepsch // *Biorheology*. – 1986. – V. 23, N 4. – P. 395 – 433.
2. Gimbrone, M. A. Vascular endothelium, hemodynamics, and the pathobiology of atherosclerosis / M. A. Gimbrone, G. García-Cardena // *Cardiovasc. Pathol.* – 2013. – V. 22, N 1. – P. 9 – 15.
3. Pu, Y. Intracranial atherosclerosis: From anatomy to pathophysiology / Y. Pu, L. Lan, X. Leng, L. K. Wong, L. Liu // *International Journal of Stroke*. – 2017. – V. 12, N 3. – P. 236 – 245.

THE INFLUENCE OF THE NON-NEWTONIAN PROPERTIES ON VISCOUS FLUID FLOW AT T-BIFURCATIONS USING THE EXAMPLE OF CEREBRAL ARTERIES

S. V. Frolov, S. V. Sindeev

Tambov State Technical University, Tambov

Abstract. Blood dynamics is investigated in the T-bifurcation region of a cerebral artery with high degree of stenosis using different non-Newtonian models of blood rheology and different flow-rate ratios between the parent artery and branch. The highest differences between Newtonian and non-Newtonian fluid models are observed at zones of slow recirculating flow.

Keywords: mathematical modeling, non-Newtonian fluid, hemodynamics.

Секция
**НОВЫЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ,
МАТЕРИАЛЫ, ТОПЛИВО И НЕТРАДИЦИОННЫЕ
ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ**

УДК 535.3

**СПОСОБ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ В АТМОСФЕРНОМ
ОПТИЧЕСКОМ КАНАЛЕ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ СО СПИРАЛЬНЫМ ФАЗОВЫМ ФРОНТОМ**

С. В. Артыщенко¹, Б. В. Семка¹, Ю. Г. Пастернак², М. В. Гусев²

¹Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил

*«Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского
и Ю. А. Гагарина», Воронеж*

²Воронежский государственный технический университет, Воронеж

Аннотация. В статье показано, что перспективным способом уменьшения потерь мощности оптического излучения, передаваемого через атмосферу, является использование пространственно-неоднородной электромагнитной волны оптического диапазона с фазовым фронтом в виде плоской спирали.

Ключевые слова: просветление атмосферного оптического канала.

Одной из основных проблем, существенно ограничивающих возможности систем лазерной атмосферной связи, мониторинга, а также лазерного оружия, являются потери мощности лазерного излучения в аэрозолях атмосферы в результате поглощения и рассеяния оптических волн частицами среды. Для густых туманов и облаков затухание может составлять до нескольких сотен дБ/км (см. работу [1] и цитированную в ней литературу).

В частности, сильное затухание лазерного излучения в туманах и облаках существенно затрудняет связь между наземной аппаратурой и спутниками.

Тем не менее привлекательность использования лазерного излучения в системах атмосферной связи и мониторинга и в средствах лазерного оружия заставляет искать новые способы формирования просветленных каналов передачи оптической энергии по атмосферному каналу.

Для существенного снижения затрат энергии на просветление атмосферного оптического канала предлагается следующий способ [1]. Для эффективной передачи энергии лазерного излучения через атмосферу создается завихренное оптическое поле с синфазной поверхностью в виде плоской спирали, воздействующее на микрочастицы неоднородной среды и создающее в ней просветленный канал, в котором концентрация рассеивателей существенно снижена. Внутри образовавшегося просветленного канала, на той же, или отличающейся длине волны, формируется лазерное излучение с плоским фазовым фронтом, энергию которого необходимо передать через неоднородную среду.

Предлагаемый авторами в работе [1] способ просветления атмосферного оптического канала, основанный на использовании завихренного лазерного излучения, поясняется на рисунке, приведенном в работе [1].

Способ реализуется следующим образом. Излучателем формируется завихренное электромагнитное поле оптического диапазона, которое излучается в сторону приемника излучения и создает в неоднородной среде распространения канал просветления. Излучателем формируется излучение оптического диапазона с плоским фазовым фронтом, которое проходит внутри образованного канала просветления в неоднородной среде и достигает приемника излучения с минимальными потерями. В качестве приемника излучения может быть объект, подлежащий уничтожению интенсивным лазерным излучением, формируемым излучателем.

Наиболее существенными силами взаимодействия оптического излучения с микрочастицами (воды, пыли, дыма и т.д.) являются следующие две силы. Первая называется силой давления света Кеплера (сила рассеяния), она пропорциональна рассеивающей поверхности частицы и интенсивности света, ее направление совпадает с вектором Пойнтинга падающей оптической волны. Вторая называется градиентной силой Лоренца, действующей на индуцированный диполь в градиенте интенсивности поля оптической волны. Объекты с показателем преломления выше, чем окружающая среда, притягиваются к областям с высокой интенсивностью света.

Приведенные в работе [1] и цитируемой там литературе данные свидетельствуют о том, что использование завихренного лазерного излучения является эффективным средством для манипулирования микрочастицами, находящимися как в воздухе, так и в вязкой жидкости.

В настоящей работе предлагается использовать завихренное лазерное излучение для просветления атмосферного канала передачи оптической энергии [1]. Преимуществом предлагаемого способа [1]

является значительное снижение затрат энергии на формирование канала с существенно уменьшенной концентрацией частиц аэрозоля и водного пара, по сравнению с традиционно используемыми способами испарения аэрозоля с помощью мощного лазерного излучения, за счет того, что в предлагаемом способе частицы аэрозоля не испаряются, а освобождают трассу распространения основного лазерного излучения, смещаясь в радиальном направлении.

Список литературы

1. Forming a transparent atmospheric optical channel by use of vortical laser beam. *Microwave and Optical Technology Letters* / S. V. Artyschenko, Yu. G. Pasternak, D. K. Proskurin, S. M. Fedorov. – 2017. – V. 59. – P. 2634 – 2638.

WAY OF ENERGY TRANSMISSION IN THE ATMOSPHERIC OPTICAL CHANNEL BY MEANS OF LASER RADIATION WITH A SPIRAL PHASE FRONT

S. V. Artyschenko¹, B. V. Siomka¹, Yu. G. Pasternak², M. V. Gusev²

¹Military Educational Research Centre of Air Force “Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin”, Voronezh

²Voronezh State Technical University, Voronezh

Abstract. The article shows that a perspective way to reduce the power loss of optical radiation transmitted through the atmosphere is to use a spatially inhomogeneous electromagnetic wave of optical band with a spiral phase front.

Keywords: enlightenment of the atmospheric optical channel.

ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА

Д. С. Джураев

*Худжандский политехнический институт
Таджикского технического университета
им. академика М. С. Осими, Худжанд*

Аннотация. Приведены основные области применения и краткий обзор свойств магнитных жидкостей на основе трансформаторного масла, а также преимущества использования магнитных жидкостей на основе трансформаторного масла взамен других масел.

Ключевые слова: магнитная жидкость, трансформаторные масла, магнитная смазка, твердая частица, смазочно-охлаждающий материал, аппарат для очистки воды, нефтепродукт.

The use of magnetic fluids in various fields of science and technology predetermines a variety of requirements for their physicochemical algorithms, taking into account the specific conditions for their use. In most cases, a number of properties of magnetic fluids uniquely determine the effectiveness of its operation, regardless of the scope of application. Among them we can name the magnetization of saturation and the resistance to the action of gravitational forces and magnetic fields – the higher they are, the higher yields of magneto-liquid devices are generally achieved. It can not be said about other properties of magnetic liquids, since they are differentiated depending on the conditions of the application. Such characteristics of magnetic fluids include viscosity, volatility, toxicity, heat resistance and special requirements for chemical stability to working media, which has been covered in sufficient detail in the literature [1, 2]. For example, when used in high-speed seals and bearing assemblies, magnetic fluids should have low viscosity and volatility combined with high thermal stability; When used as a magnetic ink – on the contrary, high volatility. When using magnetic fluids in biology and medicine, it must be borne in mind that they must be non-toxic and resistant to contact with living cells and tissues of the body.

For a number of technical problems, magnetic fluids based on oils – transformer, capacitor, etc., are needed. The obtaining of a liquid with magnetite particles in this case hardly differs from the production of liquids based on light hydrocarbons (toluene, decane, kerosene). The saturation magnetization of such liquids was 40...50 kA/m.

One of the applications of magnetic liquids based on transformer oil is their use as magnetic lubricants. Magnetic fluids based on transformer oil, compared to other oils, reduces friction by 20% more efficiently. Friction is minimal, since the basis of the magnetic fluid is transformer oil, and the size of the solid particles contained in it is several orders of magnitude smaller than the roughnesses of ideally polished rubbing parts. In addition, these magnetic fluids have found application as sealers for rotating shafts, as a damping device in radio equipment, as good lubricating and cooling materials and coolants, as well as in apparatus for cleaning water from oil products.

Transformer oil is a purified fraction of oil obtained by distillation boiling at a temperature of 300 to 400 °C. Depending on the origin of oil, it has different properties and these distinctive properties of the raw material are reflected in the properties of the oil. It has a complex hydrocarbon composition with an average molecular weight of 220...340 AU.

An additional advantage of using magnetic fluids as lubricants is that the magnetic liquids held by the magnetic field will not flow out of the unit. In addition, magnetic fluids will prevent the ingress of, for example, in the bearings, foreign non-magnetic particles (magnetic liquids expel non-magnetic materials under the influence of a magnetic field).

A magnetic fluid based on transformer oil has another amazing, truly unique property. In it, as in any fluid, bodies are floating less dense and drowning bodies that are denser than itself. But if you apply a magnetic field to it, the drowned bodies begin to surface. Moreover, the stronger the field, the heavier the body rises to the surface. Applying a different magnetic field, you can force the body to float with some given density. This property of the magnetic fluid is now used to enrich the ore. It is heated in a magnetic fluid, and then an empty rock, followed by heavy pieces of ore, is then forced to float up by the growing magnetic field.

Apply this magnetic fluid and to collect various petroleum products on the surface of the seas, oceans, lakes (for example, in the event of a tanker crash with oil, when a huge stain covers many square kilometers of the sea, polluting everything around). Purification of water from such pollution is a very difficult, long and not always feasible task. But here also helps the magnetic fluid. A small amount of magnetic liquid is sprayed onto the spilled spot from the helicopter, which dissolves quickly in the oil slick, then the strong magnets are immersed in the water, and the spot begins to contract to the point, here it is pumped by pumps [3].

Reference

1. Такетоми, С. Магнитные жидкости / С. Такетоми, С. Тикадзуми; пер. с англ. / под ред. В. Е. Фертмана. – М.: Мир, 1993. – 69 – 94, 113 – 122, 125 – 137 с.
2. Фертман, В. Е. Магнитные жидкости / В. Е. Фертман. – Минск: Высш. шк., 1988. – 9 – 44, 104 – 162 с.
3. Джураев, Д. С. Влияние температуры, давления и магнитного поля на изменение теплофизических свойств магнитных жидкостей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14 / Д. С. Джураев. – Бишкек, 2012. – 20 с.

APPLICATION OF MAGNETIC LIQUIDS BASED ON TRANSFORMER OIL

D. S. Djuraev

*Khujand Polytechnic Institute of Tajik Technical University
academician M. S. Osimi, Khujand city*

Abstract. This article presents the main applications and a brief overview of the properties of magnetic liquids based on transformer oil, as well as the advantages of using magnetic fluids based on transformer oil in place of other oils.

Keywords: magnetic fluid, transformer oil, magnetic lubricant, solid particle, cooling material, water purification apparatus, oil.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ПРОЦЕССА ПЛАВЛЕНИЯ В ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ МАЛОЙ ВМЕСТИМОСТИ

Б. С. Дмитриевский, А. В. Башкатова
*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный
технический университет», Тамбов*

Аннотация. Работа посвящена исследованию по математической модели статических и динамических характеристик дуговой сталеплавильной печи переменного тока и включает описание состава модели и установление зависимостей в установившемся режиме между входными и выходными параметрами.

Ключевые слова: математическая модель, температура, отбор тепла, статическая характеристика, динамическая характеристика, процесс плавления.

Большую актуальность на сегодняшний день получили дуговые сталеплавильные печи малой вместимости. К их преимуществам можно отнести маневренность, возможность получения высоких температур за счет преобразования электрической энергии в тепловую и использование в качестве исходного сырья как металлический лом, жидкий чугун, так и металлизированные окатыши, скрап.

Для выявления характерных особенностей протекания процесса используем математическую модель, построенную на основе схем замещения электрической цепи однофазной дуги соответствующими активными и индуктивными сопротивлениями. На рисунке 1 представлена структурная схема замещения, используемая в математической модели.

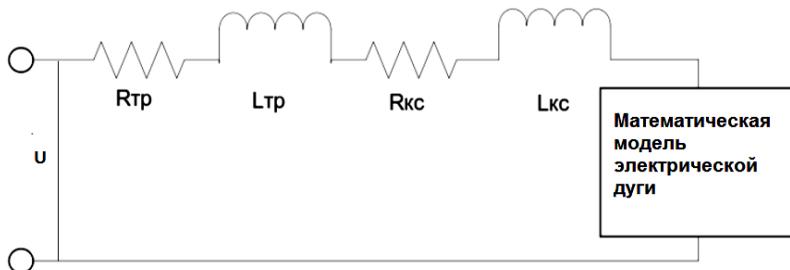


Рис. 1. Схема замещения дуговой печи

Схема включает в себя источник переменного напряжения, активные сопротивления и индуктивности трансформатора на стороне низкого напряжения и короткой сети, модель электрической дуги переменного тока. Моделирование производится в пакете MATLAB Simulink.

Одной из наиболее важных динамических характеристик дуги переменного тока как электрического объекта является зависимость напряжения от тока – вольтамперная характеристика (ВАХ). Исходя из формы ВАХ, можно говорить о характере горения дуги и ее устойчивости.

Так, например, в тех случаях, когда осциллограммы тока и напряжения дуги близки к синусоидальной форме, а форма ВАХ приобретает гладкий вид, стремящийся к виду наклонной прямой, приходим к выводу, что дуга горит устойчиво, приобретая непрерывный характер.

По полученным осциллограммам тока и напряжения были построены динамические ВАХ для разных значений «постоянная времени» проводимости дуги (рис. 2), длин дуг (рис. 3).

Как можно увидеть, характеристика для начала плавки ($\Theta = 150$ мкс), представленная на рис. 2, имеет ярко выраженные участки зажигания (пики напряжения зажигания) и потухания дуги в каждом полупериоде. С повышением температуры и изменением состава и состояния околоэлектродной среды значение «постоянная времени» проводимости дуги увеличивается, а форма ВАХ становится более гладкой и пики напряжения, необходимые для повторного зажигания дуги, становятся менее выраженными.

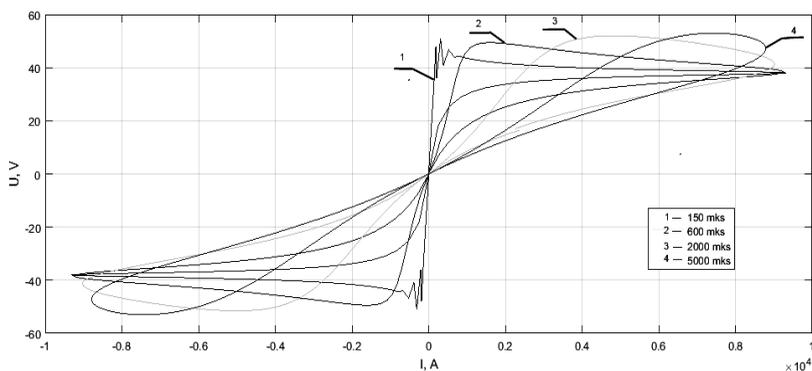


Рис. 2. Вольтамперные характеристики дуги для разных значений «постоянная времени» проводимости дуги

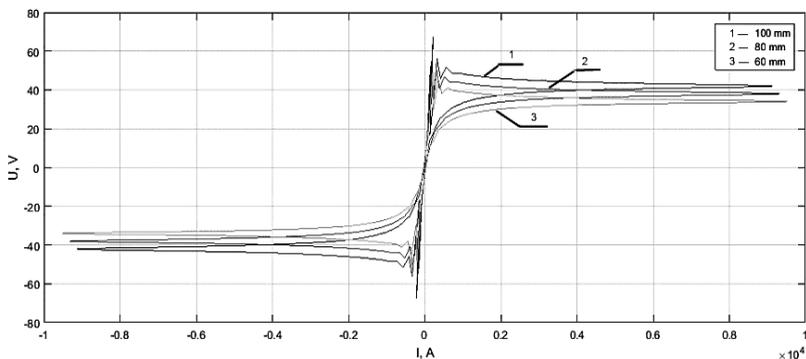


Рис. 3. Вольтамперные характеристики дуги для различных длин дуги

На последней стадии расплавления, когда дуги становятся «открытыми» и отбор тепла в окружающую среду увеличивается, форма ВАХ приобретает вид, близкий к начальным этапам расплавления. Все это определяет значительное влияние внешних возмущающих воздействий, а именно состояния окружающей среды дуги, на объект управления. В случае изменения длины дуги форма ВАХ меняется незначительно, что видно из графиков, представленных на рис. 3. Однако при этом возможно изменение электрических параметров, что требуется при управлении процессом плавки.

Особый интерес исследования объекта управления состоит в получении статических характеристик – зависимостей в установившемся режиме между входными и выходными параметрами (рис. 4).

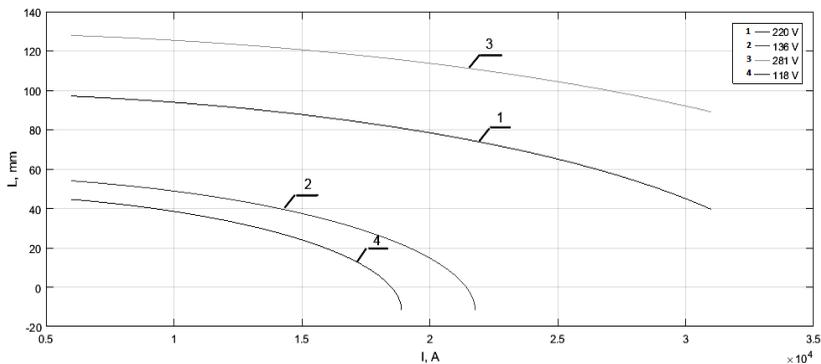


Рис. 4. Зависимость длины дуги от тока

Как видно из графиков, зависимости длины дуги от тока для разных напряжений ступеней трансформатора проявляют нелинейный характер. Коэффициент передачи объекта по току может быть вычислен только для определенных значений тока и длины дуги как тангенс угла наклона касательной в этой точке. Стоит также заметить, что коэффициенты передачи объекта напрямую зависят от параметра β (градиент потенциала в столбе дуги), который непрерывно меняется в течение всех этапов плавки.

Заключение. С помощью модели выполнено исследование одной из наиболее важных динамических характеристик дуги переменного тока сталеплавильной печи малой вместимости – зависимость напряжения от тока. С использованием разработанной модели исследовано влияние в установившемся режиме входных параметров на выходные.

Список литературы

1. Свенчанский, А. Д. Электрические промышленные печи. 4.2. Дуговые печи: учебное пособие для вузов / А. Д. Свенчанский, М. Я. Смелянский. – М.: Энергия, 1970. – 264 с.
2. Лапшин, И. В. Автоматизация технологических процессов дуговой сталеплавильной печи / И. В. Лапшин. – М.: МИСиС, 2002. – С. 157.
3. Рябов, А. В. Современные способы выплавки стали в дуговых печах: учебное пособие / А. В. Рябов, И. В. Чуманов, М. В. Шишимиров. – М.: Тепло-техник, 2007. – С. 192.
4. Глинков, Г. М. Контроль и автоматизация металлургических процессов / Г. М. Глинков, А. И. Косырев, Е. К. Шевцов. – М.: Металлургия, 1989. – С. 352.
5. Емельянов, Л. И. Проектирование установок контроля и автоматизации тепловых процессов / Л. И. Емельянов О. В. Капник. – М.: Энергия, 1966.

MODELING OF THERMAL REGIMES OF THE MELTING PROCESS ARC-ELECTRIC STEEL-FUEL PRESSES OF SMALL CAPACITY

B. S. Dmitrievsky, A. V. Bashkatova

Tambov State Technical University, Tambov

Abstract. The work is devoted to the study of the mathematical model of the static and dynamic characteristics of an AC arc furnace and includes a description of the composition of the model and the establishment of dependencies in the steady state between input and output parameters.

Keywords: mathematical model, temperature, heat selection, static characteristic, dynamic characteristic, melting process.

ТВЕРДОТОПЛИВНАЯ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЬНАЯ ПЕЧЬ С КАТАЛИТИЧЕСКИМ ДОЖИГАНИЕМ ГАЗООБРАЗНЫХ ПРОДУКТОВ НЕПОЛНОГО ГОРЕНИЯ

А. Н. Макагон¹, Р. И. Кузьмина¹, Ю. Я. Печенегов², О. В. Бурухина¹

¹ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени Н. Г. Чернышевского», Саратов
makagonan@mail.ru

²ФГБОУ ВО «Энгельсский технологический институт (филиал)
Саратовского государственного технического университета
имени Гагарина Ю. А.», Энгельс
y.pechenegov@mail.ru

Аннотация. Предложена воздухонагревательная печь с каталитическим дожиганием газообразных продуктов неполного горения твердого топлива. Выполнены эксперименты по сжиганию в печи разных видов твердого топлива. Получено, что при фильтрации топочных газов, содержащих продукты недожога, через слой частиц катализатора процесс горения полностью завершается.

Ключевые слова: обогрев помещений, печь, твердое топливо, продукты неполного горения, катализатор, экология.

Для обогрева жилых и бытовых помещений, расположенных на удаленных территориях и в сельской местности, находят применение малогабаритные переносные печи, которые работают преимущественно на твердом топливе. Типичными и хорошо известными их представителями являются печи-буржуйки.

Недостатком таких печей является малая площадь поверхности теплопередачи, которая ограничена площадью корпуса печи, контактирующей с воздухом в обогреваемом помещении. Это, а также малая интенсивность теплообмена стенки корпуса с воздухом приводят к низким тепловым к.п.д. печей и обуславливают их низкую единичную тепловую мощность. Недостатком является и наличие продуктов недожога топлива в уходящих дымовых газах, что прямо связано с низкой температурой в топочном пространстве и невозможностью управлять процессом горения.

В Саратовском государственном национальном исследовательском университете им. Н. Г. Чернышевского разработана новая воздухонагревательная печь, которая в значительной степени лишена отмеченных недостатков (рис. 1). Печь предназначена для работы преимущественно на твердом топливе.

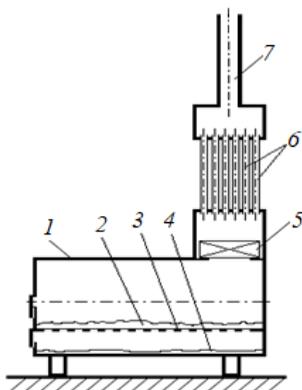


Рис. 1. Схема печи:

1 – корпус топki; 2 – слой топлива; 3 – колосниковая решетка; 4 – зола;
5 – слой зернистого катализатора; 6 – дымогарные трубки; 7 – вытяжная труба

Корпус топki цилиндрический, имеет внутреннюю огнеупорную футеровку. Фронтальная стена печи снабжена люками с крышками для загрузки топлива, подачи воздуха и удаления зольных остатков. Твердое топливо загружается в топку на колосниковую решетку порциями. Горение порции топлива протекает на протяжении 8...24 ч. Сжигание твердого топлива в слое неизбежно сопровождается образованием продуктов недожога, которые в составе дымовых газов выходят из топочного пространства.

Дымовые газы при выходе из топki фильтруются через высокотемпературный слой гранулированного твердого катализатора, где осуществляется горение продуктов недожога в газовой фазе. При фильтрации через слой катализатора из состава газовой смеси удаляются экологически вредные компоненты. Проходя далее через дымогарные трубки, продукты сгорания через стенки трубок отдают тепло окружающему воздуху.

Термостойкий катализатор является предметом изобретения [1]. Катализатор имеет основу из пористого огнеупорного материала (шамот, окись алюминия). На огнеупорный материал нанесен оксид никеля в количестве 0,5...2,5% и оксид меди в количестве 1...3% от всей массы катализатора [1]. В зависимости от используемой основы катализатор в состоянии выдерживать температуру до 1400...2000 °С.

Испытывалась опытная печь с корпусом диаметром 300 мм и длиной 500 мм. Некоторые результаты проведенных испытаний приведены в табл. 1. Полученные данные показывают, что в отходящих

1. Результаты опытов по сжиганию топлива

Вид топлива	Условия горения	Состав отходящих газов, мас. %							
		СОН	СН ₄	СО	СО ₂	Н ₂	NO _x	НСОН	Эфир
Древесина (сосна)	Некаталитическое	–	следы	0,5	12,9	0,1	–	–	–
	Каталитическое	–	–	следы	5,1	–	–	–	–
Древесностружечные плиты	Некаталитическое	0,1	0,1	0,8	12,3	–	0,1	0,1	0,6
	Каталитическое	–	следы	0,1	8,6	–	–	–	–

газах при наличии в печи слоя катализатора устраняются сажа и канцерогенные углеводороды, сводятся к минимуму выбросы СО и NO_x и токсичных кислородсодержащих соединений. Данный положительный эффект обусловлен конверсией газообразных продуктов недожога при гетерогенном катализе.

Кроме указанных в табл. 1 видов топлива, проводились эксперименты по сжиганию в печи природного газа и каменного угля. Во всех случаях фиксировалось полное сгорание топлива и отсутствие в уходящих дымовых газах экологически вредных компонентов.

Список литературы

1. Пат. РФ № 2394643. Катализатор для сжигания топлива / Кузьмина Р. И., Панина Т. Г. Опубли. 20.07.2010.

SOLID HEATING OVEN WITH CATALYTIC BURNING PRODUCTS OF INCOMPLETE COMBUSTION

A. N. Makagon¹, R. I. Kuzmina¹, Y. Y. Pechenegov², O. V. Burukhina¹

¹*Federal State Educational Institution of Higher Professional Education "Saratov state University named after N. G. Chernyshevsky", Saratov*

²*Engels Technological Institute (Branch) of the Saratov State Technical University named after Gagarin Yu. A., Engels*

Abstract. An oven for heating air with catalytic afterburning of gaseous products of incomplete combustion of solid fuel is proposed. Experiments have been conducted on combustion of various types of solid fuel in the furnace. It was found that when filtering flue gases containing unburned products, the combustion process is completely completed through a layer of catalyst particles.

Keywords: heating of premises, oven, solid fuel, products of incomplete combustion, catalyst, ecology.

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВОДЯНОГО ПАРА В КАЧЕСТВЕ ГРЕЮЩЕГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Ю. Я. Печенегов¹, Ю. А. Грачева², В. А. Денисов¹,
И. В. Черемухина¹

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

²ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский
государственный университет им. Н. Г. Чернышевского», Саратов
y.pechenegov@mail.ru

Аннотация. Обсуждены способы энергосбережения при использовании водяного пара в качестве греющего теплоносителя. Проанализировано влияние залива части поверхности теплопередачи паровых теплообменников конденсатом греющего пара на характеристики теплообменников. Показано, что наличие залива дает возможность уменьшить расход греющего пара на 10...20%. Даны рекомендации по организации работы паровых теплообменников с переохлаждением конденсата греющего пара.

Ключевые слова: паровой теплообменник, переохлаждение конденсата, расход греющего пара, энергетическая эффективность.

Водяной пар широко применяется как греющий теплоноситель в различных промышленных технологиях. Его использование часто сопровождается потерями с пролетным и вторичным паром, который образуется при самовскипании конденсата в конденсатопроводе. По данным работы [1], потери с пролетным паром в среднем по отраслям промышленности составляют 25...30% от расхода потребляемого греющего пара.

Для устранения потерь с пролетным паром важна надежная работа конденсатоотводчиков. Повышенной надежностью и эффективностью отличаются разработанные в Энгельском технологическом институте СГТУ имени Гагарина Ю. А. механические конденсатоотводчики с инверсным клапанным узлом и открытым или закрытым тунушицами поплавками [2].

Потери с вторичным паром можно устранить путем его сжатия до давления исходного греющего пара и последующей подачей в теплообменное устройство [3]. Сжатие вторичного пара с помощью струйного компрессора до давления, например, 1,2 МПа обеспечит экономический эффект в 5 млн руб. в год при расходе исходного греющего пара 1 кг/с. При других расходах греющего пара величина экономического эффекта изменится прямо пропорционально.

Потери с пролетным и одновременно с вторичным паром можно полностью устранить путем залива образующимся в теплообменном устройстве конденсатом части поверхности теплопередачи. Схема работающего с заливом теплообменника приведена на рис. 1. Слой конденсата в нижней части теплообменника перед выпускным патрубком служит гидравлическим затвором, препятствующим проходу пролетного пара.

В работе [4] авторами выполнен анализ влияния степени залива конденсатом поверхности теплопередачи парового теплообменника на его основные характеристики. Расчетами при варьировании температуры насыщения (конденсации) t_s пара при его давлении p_s в теплообменнике в интервале от 120 до 180 °С установлено, что при всех t_s величина экономии пара ΔD , получаемая за счет переохлаждения конденсата до температуры t_k , меньшей t_s , при заливе части площади поверхности теплопередачи F одинаково зависит от разности температур $t_s - t_k$, увеличиваясь с ростом этой разности. Так, при $t_s - t_k = 90$ °С величина ΔD составляет 15,5%, а при $t_s - t_k = 120$ °С достигает 20%.

Оценки экономической эффективности \mathcal{E} переохлаждения конденсата показывают, что при существующих ценах, расходе греющего пара при работе без залива $D_0 = 1$ кг/с и $\Delta D = 5\%$ величина $\mathcal{E} = 2,05 \cdot 10^6$ руб./год, а при $\Delta D = 15\%$ получаемая экономия составляет $\mathcal{E} = 6,15 \cdot 10^6$ руб./год. При изменении D_0 величина \mathcal{E} изменится пропорционально. С учетом устранения выхода из теплообменника пролетного пара при наличии залива достигаемая экономия многократно увеличивается.

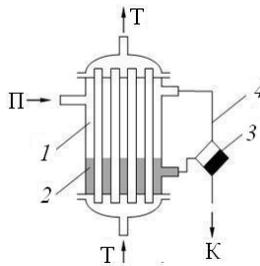


Рис. 1. Схема теплообменника с заливом конденсатом части поверхности теплопередачи:

- 1 – паровой объем; 2 – конденсат; 3 – конденсатоотводчик;
- 4 – трубка, соединяющая паровые пространства конденсатоотводчика и теплообменника; П – вход пара; К – выход конденсата;
- Т – нагреваемый теплоноситель

Список литературы

1. Лисиенко В. Г. Хрестоматия энергосбережения: справочное издание: в 2 кн. / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, М. Г. Ладыгичев. – М.: Теплоэнергетик, 2002.
2. Печенегов, Ю. Я. Новые поплавокые конденсатоотводчики с инверсным клапанным узлом / Ю. Я. Печенегов, А. В. Косов, О. Ю. Косова // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2012. – № 6. – С. 9 – 13.
3. Печенегов, Ю. Я. Экономическая эффективность рекуперации теплоты конденсата паровых теплообменников путем сжатия вторичного пара / Ю. Я. Печенегов, А. В. Косов, А. Ю. Жибалов // Промышленная энергетика. – 2013. – № 1. – С. 21 – 23.
4. Печенегов, Ю. Я. Повышение энергетической эффективности паровых теплообменников // Энергобезопасность и энергосбережение / Ю. Я. Печенегов, Ю. А. Грачева, В. А. Денисов. – 2018. – № 2. – С. 21 – 24.

ENERGY SAVING WHEN USING STEAM AS THE HEATING HEAT CARRIER

**Yu. Ya. Pechenegov¹, Yu. A. Gracheva², V. A. Denisov¹,
I. V. Cheremuhina¹**

¹*FGBOOU WAUGH “Engelssky Institute of Technology (Branch)
of the Saratov State Technical University of Gagarin Yu. A.”, Engels*

²*FGBOOU WAUGH “Saratov National Research State University
of N. G. Chernyshevsky”, Saratov*

Abstract. Ways of energy saving when using steam as the heating heat carrier are discussed. The influence of pouring of a part of a heat transfer surface of the steam heat exchangers with heating steam condensate on characteristics of the heat exchangers is analyzed. It is shown that existence of the gulf gives the chance to reduce the consumption of the heating steam by 10...20%. Recommendations about the organization of operation for steam heat exchangers with overcooling of heating steam condensate are given.

Keywords: steam heat exchanger, condensate overcooling, consumption of heating steam, power effectiveness.

Секция

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

УДК 004.93

К ВОПРОСУ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ СИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ ГОРОДА ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ

В. В. Алексеев, Д. В. Лакомов
*ФГБОУ ВО «Тамбовский технический
государственный университет», Тамбов
vvalex1961@mail.ru; LaDenV@yandex.ru*

Аннотация. Рассмотрены модернизированный алгоритм Канны, его параметры, а также его применение для обработки изображений объектов ЖКХ в сочетании с оператором Робинсона и фильтром шумов Гаусса.

Ключевые слова: анализ, изображения, оператор, Робинсон, Канны, фильтр, Гаусс.

В современных системах жизнеобеспечения города раннее выявление нарушения целостности или повреждений объектов БПЛА в автономном режиме затруднено тем, что воздействие негативных внешних и внутренних факторов вносит в этот процесс неопределенность, приводящую к размытости изображений. В связи с этим применяются алгоритмы и модели, позволяющие уменьшить влияние неопределенности при анализе изображений. Одним из таких алгоритмов является модернизированный алгоритм Канны.

Выполнение модернизированного алгоритма Канны начинается с предварительного этапа, на котором изображение преобразуется в градации серого. Для этого достаточно представить изображение в YUV-модели:

$$Y = 0,299 R + 0,587 G + 0,114 B;$$

где R , G , B – интенсивности красного, зеленого и синего цветов [1].



Рис. 1. Обработка изображения теплопровода в ИК-диапазоне

Первый этап алгоритма Канни – сглаживание, так как для получения устойчивого результата необходима фильтрация шумов. Для сглаживания применяются алгоритмы размытия изображения.

Второй этап алгоритма – поиск градиентов. Алгоритм Канни применяет четыре фильтра для определения вертикальной, горизонтальной и двух диагональных границ.

Третий этап алгоритма – подавление немаксимумов. Пикселями границы являются пиксели, в которых достигается локальный максимум градиента в направлении вектора этого градиента.

Четвертый этап алгоритма – двойная пороговая фильтрация. Все точки, обозначенные как локальные максимумы, проходят через два порога T_{\min} и T_{\max} , задаваемых пользователем.

Заключительный пятый этап алгоритма – трассировка области неоднозначности. На этом этапе обрабатываются пиксели, градиенты которых находятся в диапазоне между порогами [2].

На рисунке 1 показан результат обработки изображения модифицированным алгоритмом.

Достоинствами алгоритма Канни являются:

- минимизация множественного отклика на фильтр;
- увеличение значения отношения сигнал/шум;
- улучшенные показатели распознавания на зашумленных изображениях за счет сглаживания.

К недостаткам алгоритма можно отнести:

- отсутствие четких критериев выбора порогов, что приводит к искажению и потере части реальных контуров и к появлению ложных контуров.

– округление углов границ объектов, что приводит к повреждению или разрушению границ в точках соединения.

Результаты испытания программной реализации алгоритма Канны:

1. Программная реализация алгоритма Канны позволяет выделять технологические объекты как на четких, так и на размытых изображениях, а также распознает наличие повреждений объектов на изображениях. Результаты исследования возможно применять в системах жизнеобеспечения города.

2. Основными помехами при анализе изображений являются физические неровности фоновой поверхности, а также отражения источников света на данной поверхности.

3. Рекомендуемые параметры работы алгоритма для четких изображений: $T_{\min} = 20$, $T_{\max} = 45$, $\sigma = 1$. Рекомендуемые параметры работы алгоритма для размытых изображений: $T_{\min} = 5$, $T_{\max} = 15$, $\sigma = 0,01$.

Список литературы

1. Дидрих, В. Е. Применение контурного анализа для идентификации объектов в изображениях / П. Р. Мадроньеро, В. Е. Дидрих // Информатика: проблемы, методология, технологии: материалы XIII Междунар. науч.-метод. конф., Воронеж, 2013 г.: в 4 т. – Воронеж: Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета. – Т. 2. – 2013. – С. 290 – 293.

2. Алексеев, В. В. Оператор Робинсона и его применение в алгоритме Канны для распознавания изображений в условиях неопределенности: материалы XV Всерос. науч. конф. «Нейрокомпьютеры и их применение»: тез. докл. / В. В. Алексеев, Д. В. Лакомов. – М.: ФГБОУ ВО МГППУ, 2017. – С. 89–90.

ON THE ISSUE OF IMAGE PROCESSING OF OBJECTS OF LIFE SUPPORT SYSTEMS OF THE CITY TO DETECT DAMAGE

V. V. Alekseev, D. V. Lakomov

Tambov State Technical University, Tambov

Abstract. The paper considers the modernized Canny algorithm, its parameters, as well as its application to image processing of housing and communal services objects in combination with the Robinson operator and the Gauss noise filter.

Keywords: analysis, images, operator, Robinson, Canny, filter, Gauss.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И ВЫБОР РЕШЕНИЯ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

В. И. Анциферова, И. И. Струков, С. В. Гречаный
*ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический
университет имени Г. Ф. Морозова», Воронеж*

Аннотация. Рассмотрены основные принципы моделирования процессов в информационных системах и выбор решения на их основе.

Ключевые слова: информационная система, базы данных.

Моделирование и оптимизация параметров и режимов сложных ИС на всех этапах жизненного цикла и на всех уровнях организации, функционирования и управления таких систем представляют собой трудоемкую задачу большой размерности. Одним из путей решения таких задач является привлечение эффективного аппарата многокритериальной оптимизации (МКО).

Использование процедур МКО накладывает ряд организационных и вычислительных ограничений. Так, перебор большого количества вариантов недоминируемых решений от итерации к итерации ведет к переполнению памяти вычислительной среды, при этом увеличивается время поиска, уменьшается точность полученных решений.

Сведение же исходной векторной формы на скалярное требует теоретического обоснования причин выбора того или иного «главного» критерия или способа построения критериальной свертки, что в свою очередь снижает эффективность полученной скалярной модели [1 – 9].

Основным недостатком существующих методов отсева решений является то, что отбор части «хороших», с точки зрения поставленной задачи вариантов, как правило, основывается на случайном выборе. При этом нет объективных обоснований – почему был сделан выбор той или иной части множества недоминируемых решений. Поэтапный поиск решений и проводимый на нем выбор описывается разнородными способами формализации, привязанными к конкретному используемому методу. Принятие окончательного решения на сформированном множестве недоминируемых альтернатив также затруднено.

Эти особенности численных схем МКО в свою очередь предъявляют повышенные требования к математическому и программному обеспечению. Очевидно, что наиболее приемлемый путь решения задачи – это использование эффективных процедур, ведущих к повыше-

нию качества полученного решения. При этом необходимо проводить обоснованный выбор решений как на итерациях поиска, так и при принятии окончательного решения.

Формализация задачи. Готовая математическая запись конкретной задачи оптимизации имеется в относительно редких случаях. Как правило, первым шагом является постановка и формализация практической модели. Этот этап осуществляется специалистом в этой области («заказчиком») и математиком, который будет решать задачу («вычислителем»).

Затем идет математическая формализация задачи. Важно здесь участие «вычислителя». На этом этапе выбираются независимые переменные, формализуется вектор критериев оптимизации и ограничения.

На следующем этапе проводится первоначальное математическое изучение построенной модели – к какому классу она относится, какие вычислительные и программные средства имеются и т.д. Рассматриваются общие характеристики задачи (выпуклости, особые случаи экстремума, ошибки при вычислении и т.д.).

Далее в построенной модели изучаются проблемы получения исходной информации. Во многих задачах есть трудности получения достоверных исходных данных. Часто приходится решать вспомогательные задачи идентификации исходных параметров.

Результатом формализации задачи является окончательная математическая формулировка модели оптимизации.

Выбор метода и численной схемы. Обычно решение имеется в численной форме, с использованием ЭВМ. Важным здесь является вопрос о выборе метода численного решения, так как именно он существенно влияет на продолжительность и точность процесса. Затем идет процесс выбора алгоритма, численных схем, поиск и устранение ошибок и изменение параметров поиска.

В результате окончательно формируются все необходимые данные для решения задачи и проводится решение задачи оптимизации.

Принятие решения. Процедура принятия решения может применяться не только на этапе выбора единственного решения после процесса решения задачи оптимизации, но и в процессе поиска. Для этого необходимо построить функцию и механизмы выбора, которые обеспечивали бы поддержку решений для эксперта, который в теории задач МКО носит название «лицо, принимающее решение» (ЛПР). В результате мы получаем численное решение поставленной задачи.

Анализ результатов. На этом этапе оценивается точность найденного решения. Точность можно проверить как теоретически, так и экспериментально, произведя спуск из разных начальных точек и затем

сравнить полученные результаты. Затем необходимо провести содержательный анализ найденного решения, так как математическая формулировка была получена в результате ряда упрощений исходной модели. Может быть не учтено слишком много исходных факторов и найденное решение не удовлетворит заказчика. Тогда необходимо пересмотреть исходную модель, внести изменения и заново решить задачу оптимизации.

Таким образом, мы получаем окончательное решение задачи.

Список литературы

1. Автоматизация управления и проектирования в электронной промышленности [Текст]: монография / Ю. К. Фортинский, В. Е. Межов, В. К. Зольников, П. П. Куцько. – Воронеж: ВГУ, 2008. – 275 с.
2. Анциферова, В. И. Анализ подготовки специалистов по радиоэлектронике для научно-производственных и коммерческих структур в современных условиях [Текст] / В. И. Анциферова, В. К. Зольников // Моделирование систем и процессов. – 2009. – № 3-4. – С. 5 – 12.
3. Архитектура нейропроцессоров для систем автоматического управления подвижными объектами / В. М. Антимиров, В. К. Зольников, В. В. Лавлинский, В. П. Крюков, А. Ю. Кулай, А. Л. Савченко // Моделирование систем и процессов. – 2017. – Т. 10, № 4. – С. 4 – 10.
4. Анциферова, В. И. Интеграция средств автоматизации проектирования в обучающих системах радиоэлектроники / В. И. Анциферова, С. А. Евдокимова, Т. В. Скворцова // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 2. – С. 11 – 16.

MODELING OF PROCESSES AND CHOICE OF SOLUTION IN INFORMATION SYSTEMS

V. I. Antsiferova, I. I. Strukov, S. V. Grechanii

*Voronezh State Forestry Engineering University
named after G. F. Morozov, Voronezh*

Abstract. The basic principles of modeling processes in information systems and the choice of solutions based on them are considered.

Keywords: information system, databases.

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СУБД ОТРАСЛЕВОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

В. И. Анциферова, И. И. Струков, С. В. Гречаный
*ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический
университет имени Г. Ф. Морозова», Воронеж*

Аннотация. Рассмотрены основные принципы создания базы данных и их управления для отраслевой информационной системы.

Ключевые слова: информационная система, базы данных.

Детальный анализ принципов построения и возможностей наиболее популярных СУБД [1] позволяет определить важнейшие требования или возможности, которые могут быть приняты как основные критерии для сравнительной оценки СУБД. К ним в первую очередь можно отнести: стоимость приобретения и обучения, реализацию системы запросов SQL, управления транзакциями, интерфейс программирования, среду сервера базы данных, администрированное управление базой данных, средства надежности, форматы файлов для импортно-экспортных операций, средства безопасности, коммуникационные средства, целостность базы данных, объектную ориентацию, функции хранения данных, масштабируемость, встраиваемость, свойства реального времени.

Рассмотрим наиболее важные критерии и их реализацию для рассматриваемой предметной области.

Реализация запросов SQL должна осуществляться в соответствии с требованиями стандарта «ANSIX3/135-1992» (в дальнейшем – ANSI-92).

Учитывая сложную иерархическую структуру ИС, в которой возможно включение новых ИС, изменение существующих ИС, модификацию данных, средства манипулирования данными языка SQL должны обеспечивать: простое и множественное добавление данных в БД, их корректировку, удаление, поиск и выборку по заданным условиям; поисковые операции должны обеспечивать выполнение явных и неявных объединений таблиц в количестве, предусмотриваемом стандартом ANSI-92; поисковые операторы должны обеспечивать группировку данных по значениям агрегатных функций; запросы к БД должны разрешать вложенные подзапросы в количестве, предусмотриваемом стандартом ANSI-92; проверять результат выполнения вложенного подзапроса; задавать ограничения для сгруппированной таблицы с

целью исключения групп, не удовлетворяющих заданным условиям; объединение результатов нескольких однотипных запросов в общий результат в соответствии со стандартом ANSI-92; поиск данных по шаблону, сравнение с неопределенным (NULL) значением; выборку из заданного диапазона значений; комбинирование результатов поиска с помощью логических условий; поддержку позиционных запросов, агрегатных и пользовательских функций и вычисляемых выражений в операторах манипулирования данными и в условиях выборки.

Кроме того, должно быть предусмотрено использование скалярных и агрегатных функций в вычисляемых выражениях, причем в качестве агрегатных функций должны быть реализованы функции MIN, MAX, AVG, SUM, COUNT, DEFAULT; набор скалярных функций должен обеспечивать манипулирование строками и числами, приведение одного типа данных к другому; возможность выполнения арифметических операций над числовыми типами данных и строковых операций над строковыми типами данных при выполнении запросов.

В СУБД должны быть предусмотрены многоуровневые средства защиты данных от несанкционированного доступа, в том числе: реализация дискреционного доступа к объектам БД, т.е. назначение прав на операции по чтению и модификации данных отдельным пользователям и ролям; реализация мандатного доступа, т.е. назначение уровней доступа к объектам БД на чтение и запись вплоть до конкретного поля конкретной записи пользователям и группам пользователей.

В системе должна быть реализована подсистема горячего резервирования, предназначенная для повышения надежности информационных систем за счет полного дублирования процессов обслуживания базы данных на резервном сервере базы данных. Данная подсистема должна позволять в моменты аварии одного из задублированных серверов переключать взаимодействие прикладных задач на другой сервер и делать таким образом факт аварии одного из серверов незаметным с точки зрения прикладных задач и таким образом обеспечить надежность информационной системы в целом.

Система должна содержать средства проверки (тестирования) целостности файлов базы данных на физическом уровне представления при незапущенном ядре СУБД и средства «горячего» тестирования (тестирования «на ходу»).

Проведенный анализ объема хранимых данных, их структуры с учетом развития позволяет определить, что в СУБД должны быть обеспечены следующие типы данных: символьные строки длиной до 4000 символов; время и дата (любые даты нашей эры); короткое целое (2 байта); длинное целое (4 байта); байтовые строки длиной до 4000;

числа с плавающей точкой одинарной точности (длина 4 байта); числа с плавающей точкой двойной точности (длина 8 байт); числа с фиксированной точкой (точность 30 знаков, после запятой 10 знаков); большие двоичные поля неструктурированных и структурированных данных (текст, графика, видео и др.) длиной до 10 Гигабайт.

Данный набор поддерживаемых типов данных столбцов соответствует операциям с данными, предусмотренным стандартом ANSI-92, и позволяет представить и обработать в реляционной модели БД любую информацию.

СУБД должна обеспечивать следующие количественные характеристики: число таблиц в одной БД до 200 000; число столбцов в таблице до 250; число записей в одной таблице до 1 млрд; длина записи до 4000 байт; количество ключей в одной таблице до 100; длина ключа до 128 байт; количество BLOB-полей в одной записи до 16.

Список литературы

1. Автоматизация управления и проектирования в электронной промышленности [Текст]: монография / Ю. К. Фортинский, В. Е. Межев, В. К. Зольников, П. П. Куцько. – Воронеж: ВГУ, 2008. – 275 с.

2. Анциферова, В. И. Анализ подготовки специалистов по радиоэлектронике для научно-производственных и коммерческих структур в современных условиях [Текст] / В. И. Анциферова, В. К. Зольников // Моделирование систем и процессов. – 2009. – № 3-4. – С. 5 – 12.

3. Архитектура нейропроцессоров для систем автоматического управления подвижными объектами / В. М. Антимиров, В. К. Зольников, В. В. Лавлинский, В. П. Крюков, А. Ю. Кулай, А. Л. Савченко // Моделирование систем и процессов. – 2017. – Т. 10, № 4. – С. 4 – 10.

4. Анциферова, В.И. Интеграция средств автоматизации проектирования в обучающих системах радиоэлектроники / В. И. Анциферова, С. А. Евдокимова, Т. В. Скворцова // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 2. – С. 11 – 16.

PRINCIPLES OF DBMS INDUSTRY INFORMATION SYSTEM

V. I. Antsiferova, I. I. Strukov, S. V. Grechanii

*Voronezh State Forestry Engineering University
named after G. F. Morozov, Voronezh*

Abstract. Basic principles of database creation and management for industry information system are Considered.

Keywords: information system, databases.

ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОНОКУЛЯРНОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ РАССТОЯНИЙ МЕЖДУ ОБЪЕКТАМИ

А. М. Бабич, В. Р. Роганов, В. О. Филиппенко

ФГБОУ ВО «ПензГТУ», Пенза

Vladimir_roganov@mail.ru

Аннотация. Рассмотрен вариант определения дистанции до выбранного объекта с использованием монокулярной системы технического зрения. Эксперименты показали, что такой подход может использоваться и при определении размера рассматриваемого объекта, что позволяет использовать его для управления мобильными роботами. Предложен алгоритм, реализующий данный метод.

Ключевые слова: монокулярная система, нейронные сети, дистанция.

Разработка мобильных роботов и сокращение сроков их внедрения в народное хозяйство – одна из актуальных задач [1]. При решении этой задачи необходимо предотвращать столкновения с препятствиями [2]. В основу этой статьи было положено одно из таких решений для системы управления мобильного робота класса «Профи», принявшего участие во всероссийских соревнованиях РОБОФЕСТ. Трасса позволяла использовать маячки, расположенные на поворотах трассы [3]. Для упрощения была реализована система, ориентированная на маячок в виде оранжевого шарика для настольного тенниса диаметром 40 мм. Для более качественного выделения маячка из других фигур он подсвечивался светодиодом [4].

В качестве датчика технического зрения была использована веб-камера Genuine Logitech C270 с частотой захвата 30 кадров в секунду и углом обзора 48.4° с убранными опциями «Right Light» и «Усиление». Мобильный робот был создан на подвижной платформе, управляемой аппаратной вычислительной платформой Arduino. Для реализации программы управления использованы библиотеки OpenCV – для обработки изображений с видеокамеры и FANN – для операций с нейронными сетями для ОС Windows.

При проведении экспериментов маячки выстраивались в ряд, соприкасаясь друг с другом. Движение тележки с системой технического зрения начиналось с расстояния 1,5 м по направлению к маячкам. За-

дача считалась выполненной, если тележка останавливалась на расстоянии 10 см до маячка.

Работа программы начиналась с захвата изображения с видеокамеры. Далее по признаку оранжевого цвета отслеживались маячки по параметрам:

$$\begin{aligned}R_i < G_i < B_i; \\G_i - B_i >= R_i - G_i - 20; \\R_i > 180; \\R_i - G_i > 20; \\G_i - B_i > 20.\end{aligned}$$

Из отфильтрованных пикселей формировалось отдельное черно-белое изображение, которое после обработки позволяло определить контур фигуры. Если ширина превышала 10 пикселей (нижний порог), то ее значение записывалось в вектор данных. Данный процесс повторялся итеративно до тех пор, пока ширина объекта не превышала верхнего порогового значения, равного 160 пикселям (рис. 1).

Структура нейронной сети из трех слоев была выбрана исходя из возможностей, определяемых особенностями реализации библиотеки FANN для C++. Количество нейронов во входном слое и количество элементов массива равно 50. Количество нейронов в выходном слое соответствует количеству объектов, на которых обучалась сеть, – 4. Экспериментально было подобрано, что количество нейронов в выходном слое должно быть равным 7. Функция активации нейронов – сигмоидальная симметричная. В качестве обучающего алгоритма выбран алгоритм обратного распространения ошибки. Эксперименты показали, что на момент окончания этапа сбора данных система тех-



Рис. 1. Обработанный кадр с видеокамеры (а) и соответствующий отфильтрованный по оранжевому цвету кадр (б)

нического зрения (СТЗ) получала 50 убывающих значений ширины объекта на изображении, наблюдаемого через равные промежутки времени (0,033 с).

При анализе данных и передаче значений массива на вход нейронной сети по полученному вектору с единственным единичным элементом делался вывод о наблюдаемом объекте [3].

На первом этапе происходит обучение нейронной сети на примере динамики приближения некоторого количества объектов разного размера. Каждый входной вектор представляет собой последовательность значений, соответствующих ширине объекта в пикселях в заданный момент времени, начиная с момента, в котором ширина объекта равна некоторому значению j_1 . Количество входных векторов соответствует количеству объектов. Первый этап является предварительным и осуществляется один раз перед непосредственной эксплуатацией СТЗ.

Второй этап осуществляется в ходе работы СТЗ (движения робота). Через равные промежутки времени T происходит получение изображения с видеокамеры. Затем изображение обрабатывается: за счет сглаживания происходит фильтрация помех, выделяются границы сред, происходит распознавание объекта-препятствия.

Если объект распознан, то определяется его горизонтальная составляющая, и если она не превышает заранее заданного значения j_1 , то она записывается в базу данных. Далее весь процесс повторяется итеративно.

В ходе работы экспериментального стенда СТЗ показала устойчивое распознавание объектов при условии сохранения скорости движения платформы, при которой проводилось обучение.

Список литературы

1. Бабич, А. М. Алгоритм использования нейронной сети в системе технического зрения мобильного робота // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетеχνическая. Вып. 2. ОАО «ЦНИИ «Электроника»» / А. М. Бабич. – М., 2011. – С. 116 – 122.
2. URL: <http://www.russianrobofest.ru/olimpiada> (дата обращения 15.02.2018).
3. URL: <http://www.russianrobotics.ru> (дата обращения 15.02.2018).
4. Бабич, А. М. Использование монокулярной системы технического зрения при оценке расстояния до препятствий // Вопросы радиоэлектроники / А. М. Бабич, В. Р. Роганов. – 2008. – Т. 2, № 5. – С. 107 – 111.

POSSIBILITY OF USING THE MONOCULAR SYSTEM OF TECHNICAL VISION WHEN DETERMINING THE DISTANCES BETWEEN THE OBJECTS

A. M. Babich, V. R. Roganov, V. O. Filippenko

Penza State Technological University, Penza

Abstract. A variant of determining the distance to the selected object using a monocular vision system is considered. Experiments have shown that this approach can be used in determining the size of the object in question, which allows it to be used to control mobile robots. An algorithm is proposed that implements this method.

Keywords: monocular system, neural networks, distance.

References

1. Babich, A. M. Algorithm for the use of a neural network in the system of vision of a mobile robot // Radioelectronics questions Series "General technical". – Is. 2. OJSC "CRI" Electronics" / A. M. Babich. – M., 2011. – P. 116 – 122.
2. URL: <http://www.russianrobofest.ru/olimpiada> (the date of circulation is 15.02.2018).
3. URL: <http://www.russianrobotics.ru> (the date of circulation is 15.02.2018).
4. Babich, A. M. Using a monocular vision system in assessing the distance to obstacles // Radioelectronics / A. M. Babich, V. R. Roganov. – 2008. – V. 2, N 5. – P. 107 – 111.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫМ РЕЖИМОМ В ПРОЦЕССЕ СОРТИРОВКИ КЛУБНЕЙ КАРТОФЕЛЯ

П. В. Балабанов, А. Г. Дивин, В. В. Прилипухов,

С. С. Шапошникова

*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный
технический университет», Тамбов*

pav-balabanov@yandex.ru; agdv@yandex.ru

Аннотация. Описана система управления температурным режимом в процессе сортировки клубней картофеля с использованием теплового неразрушающего контроля. Процесс контроля основан на использовании тепловизионных камер, регистрирующих температурное поле поверхности клубней, перемещающихся в поле зрения камер на вращающихся роликах, обеспечивающих перемещение с одновременным вращением. Для обработки изображений с тепловизионных камер используется программное обеспечение, разработанное в среде LabVIEW NIVISION. Для уверенного обнаружения дефектов на клубнях необходимо, чтобы транспортирующие части макета для сортировки имели одинаковую температуру, отличную от исследуемых образцов. Это необходимо, чтобы обеспечить контраст изображения клубня картофеля на фоне роликов и зазора между ними.

Ключевые слова: программа, термоэлектрический преобразователь, электронагреватель, ролики, картофель.

Сортировка картофеля по качеству является одной из важнейших операций после его уборки. Дефекты картофеля значительно снижают его качество и уменьшают срок хранения. В настоящее время сортировка картофеля в лучшем случае механизирована, но на многих предприятиях РФ до сих пор осуществляется вручную. В связи со значительным увеличением объема производства картофеля необходимо автоматизировать процесс его сортировки.

Результат предварительных экспериментов, проведенных авторами [1], показал, что для использования технического зрения в процессе сортировки клубней картофеля необходимо нагревать ролики и поверхность под ними до одинаковой температуры, которая будет отличаться от температуры объектов контроля. Это обеспечит достаточную для обнаружения клубней контрастность изображения. Для нагрева используется электронагреватель с вмонтированным в него термоэлектрическим преобразователем. На макет, непосредственно

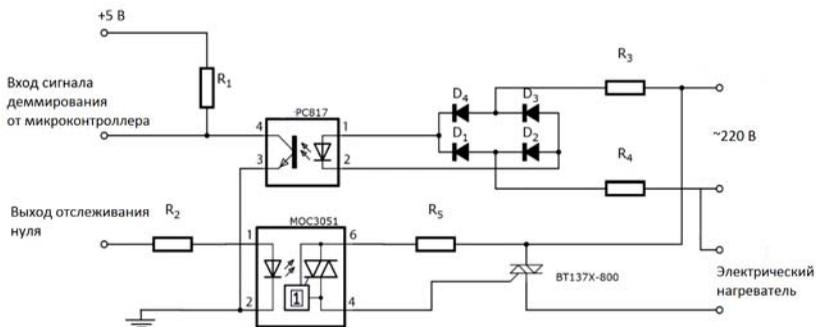


Рис. 1. Электрическая принципиальная схема диммера

рядом с роликами также установлен термоэлектрический преобразователь. Все данные с тепловизионных камер программно обрабатываются с помощью устройств сбора данных от National Instruments. Температурный режим контролируется с помощью диммера (рис. 1) и микроконтроллера.

Для автоматического нагрева роликов применяется пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор температуры, который реализован в среде LabVIEW NIVISION, что позволяет наиболее точно поддерживать температуру роликов (рис. 2).

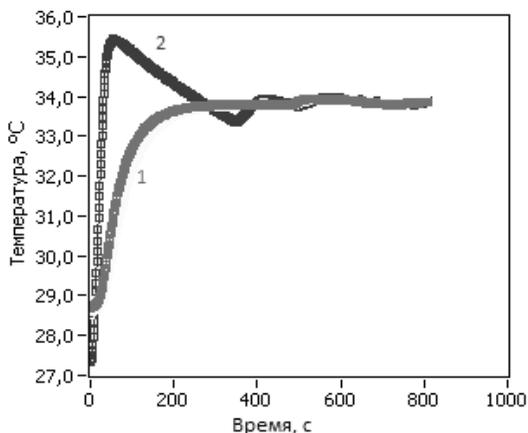


Рис. 2. График температур:
1 – температура роликов; *2* – температура нагревателя



Рис. 3. Изображение клубня картофеля в ИК-диапазоне

Таким образом, разработанная система позволяет поддерживать нужный температурный режим на поверхности транспортирующих частей макета конвейера, что в свою очередь позволяет обнаружить клубни картофеля на изображениях с тепловизионных камер (рис. 3).

Список литературы

1. Thermal control of potatoes quality / A. G. Divin, A. A. Churikov, P. V. Balabanov, A. P. Savenkov, A. S. Egorov: proceedings of the 2017 International Conference “Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies”, IT and QM and IS 2017.

**TEMPERATURE MANAGEMENT SYSTEM IN THE PROCESS
OF SORTING POTATO TUBERS**

P. V. Balabanov, A. G. Divin, V. V. Prilipukhov, S. S. Shaposhnikova
Tambov State Technical University, Tambov

Abstract. The article describes the temperature control system in the process of sorting potato tubers using thermal non-destructive testing. The process of control is based on the use of thermal imaging cameras recording the temperature field of the surface of tubers moving in the field of view of the cameras on rotating rollers, providing movement with simultaneous rotation. The software developed in the LabVIEW NI VISION environment is used to process images from thermal imaging cameras. For confident control of defects on tubers, it is necessary to transport a part of the layout for sorting carried out at the same temperature different from the samples under study. This is necessary to ensure the contrast of the image of club potatoes against the background of the rollers and the gap between them.

Keywords: program, thermoelectric converter, electric heater, rollers, potatoes.

АЛГОРИТМ ОБРАТИМОГО СЖАТИЯ КАДРОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ РАЗБИЕНИЯ СЕКУЩИМИ

И. В. Богачев, А. В. Левенец

*Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск
ilya.bogachev.pnu@mail.ru; levalvi@mail.ru*

Аннотация. Предложен алгоритм обратимого сжатия кадров измерительных данных, в основе которого лежит отображение исходных данных, представленных в битовом виде, на плоскость с последующим разбиением на строго однородные области. Приведены экспериментальные результаты, показывающие, что предложенный подход обеспечивает достаточно высокую общую эффективность сжатия кадров данных различного типа.

Ключевые слова: телеметрические данные, кадры данных, сжатие, коэффициент сжатия.

Задача сжатия измерительных данных остается актуальной и в настоящее время, несмотря на активное развитие вычислительной и информационно-телекоммуникационной техники. В классических алгоритмах сжатия принято учитывать только явные корреляции [1, 2], определяющиеся особенностями как информационно-измерительных систем (ИИС), так и измеряемых физических процессов, что задает для них границу верхнего коэффициента сжатия, применительно к измерительным данным. В таком случае более эффективным будет подход, учитывающий также неявные корреляции [3], которые задаются неучтенными взаимодействиями между параметрами системы, принятыми способами представления и кодирования информации в ИИС и т.д.

В основе предлагаемого в работе алгоритма лежит разбиение множеством секущих телеметрического кадра, представленного в битовом виде и отображенного на плоскость, на строго однородные области, которые могут состоять либо только из нулевых, либо только из единичных битов. Следует отметить, что под разбиением секущими предлагается понимать такое разбиение, при котором битовое представление телеметрического кадра разбивается на области с использованием множества пар отрезков, являющихся секущими для периметра плоскости, на которую был отображен кадр. При этом под парой секущих понимается два секущих отрезка, перпендикулярных друг к другу.

Данный алгоритм не позволяет непосредственно закодировать полученные области. В таком случае, чтобы восстановить структуру исходного кадра, необходимо иметь набор точек, через которые проходят секущие, а также тип каждой из полученных в результате разбиения областей (нулевая либо единичная). При этом их число (Q_A) будет вычисляться согласно следующей формуле:

$$Q_A = (Q_P + 1)^2,$$

где Q_P – число точек, через которые проходят парные секущие.

Алгоритм разбиения секущими состоит из следующих шагов:

Шаг 1. Создается буфер кодов (БК), в который предлагается помещать коды, описывающие структуру кадра после разбиения.

Шаг 2. Из всех точек, через которые могут проходить парные секущие, строятся все возможные сочетания без повторов, состоящие из одного элемента, а результат заносится в буфер сочетаний (БС).

Шаг 3. С использованием каждого из элементов БС происходит разбиение структуры телеметрического кадра данных.

Шаг 4. Если все полученные в результате разбиения области являются неоднородными, то происходит переход к *шагу 5*. В противном случае в БК последовательно заносятся пары координат всех точек, через которые проходят парные секущие и тип каждой полученной области, после чего разбиение завершается, а результаты фиксируются в специальном формате описания.

Шаг 5. Из всех точек, через которые могут проходить парные секущие, строятся все возможные сочетания без повторов, число элементов в которых на единицу больше предыдущего, после чего происходит переход к *шагу 2*.

Процедура восстановления кадра основывается на его повторном разбиении. При этом точки, через которые будут проведены парные секущие, и типы полученных после разбиения областей определены в формате, что существенно уменьшает затрачиваемое на разбиение время и делает алгоритм асимметричным.

Тестирование предложенного алгоритма, для которого в целях сохранения баланса между эффективностью и скоростью сжатия число пар секущих было ограничено двумя, проводилось на наборах данных (НД), полученных от ряда объектов энергетики, и объем которых составлял от 11 до 19 тыс. кадров. В тестовые наборы входили данные, полученные как в штатном режиме работы объекта, так и полученные в режиме перевода энергосети из одного режима в другой.

При проведении исследования были использованы следующие алгоритмы сжатия данных: RLE (AC1); LZW (AC2); алгоритм сжатия на основе разбиения секущими (AC3). Важно отметить, что алгоритмы

1. Усредненные параметры алгоритмов

Параметр	АС	НД				
		НД1	НД2	НД3	НД4	НД5
СКС, ед.	АС1	1,99	1,51	2,00	1,68	2,33
	АС2	1,76	1,63	1,89	1,88	2,25
	АС3	3,06	1,21	2,70	1,57	3,53
СВС, мс	АС1	0,011	0,019	0,012	0,019	0,014
	АС2	0,029	0,037	0,031	0,040	0,033
	АС3	0,936	3,344	0,949	2,611	1,323

АС1 и АС2 представляют собой классические алгоритмы общего назначения и использовались в целях сравнения их параметров с предложенным в работе алгоритмом АС3.

Для определения характеристик алгоритмов было проведено исследование, в котором над каждым НД проводилось сжатие с помощью всех предложенных алгоритмов и при этом фиксировались такие параметры, как средний коэффициент сжатия (СКС) и среднее время сжатия (СВС). Результаты тестирования приведены в табл. 1.

В сравнении с алгоритмами общего назначения, алгоритм АС3 затрачивает незначительно большее среднее время сжатия, обеспечивая наибольший средний коэффициент сжатия для стационарных данных, при этом для нестационарных данных этот показатель несколько ниже, чем у алгоритмов АС1 и АС2, а временные затраты более значительны.

Результаты проведенных исследований показали, что предложенный алгоритм обратимого сжатия измерительных данных обеспечивает достаточно высокий средний коэффициент сжатия на данных с различными стационарными свойствами. При этом его дальнейшее развитие можно связать с оптимизацией быстродействия, в частности, с сокращением числа сочетаний точек, через которые проходят парные секущие при попытках разбиения кадра.

Список литературы

1. Бевецкий, А. В. Алгоритм блочного сжатия измерительных данных / А. В. Бевецкий, А. В. Левенец // Ученые заметки ТОГУ. – 2013. – Т. 4, № 4. – С. 811 – 818.
2. Капля, В. И. Сжатие измерительной информации методом Хаффмана с использованием таблицы уникальных величин / В. И. Капля, А. Г. Бурцев, И. И. Тимофеев // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. – 2011. – № 3.
3. Левенец, А. В. Методы и алгоритмы сжатия измерительных данных в информационно-измерительных системах / А. В. Левенец, Ен Ун Чье. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2016. – 200 с.

ALGORITHM OF REVERSIBLE COMPRESSION OF FRAMES OF MEASUREMENT DATA BASED ON PARTITION BY SECANTS

I. V. Bogachev, A. V. Levenets

Pacific National University, Khabarovsk, Russian Federation

Abstract. The article proposes an algorithm for reversible compression of measurement data frames, which is based on the mapping of the initial data presented in a bit form to a plane with subsequent subdivision into strictly homogeneous regions. Experimental results show that the proposed approach provides high overall compression efficiency of data frames of various types.

Keywords: measurement data, data frame, compression, compression ratio.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ГРАФИКОВ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ И ВЗАИМНО КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТА

Д. Н. Воробьев, Ю. В. Минин, Г. Н. Нурутдинов

*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный
технический университет», Тамбов*

Аннотация. Работа посвящена определению динамических характеристик технического объекта на основе анализа графиков корреляционных и взаимно корреляционных функций. Сформированы оценки изображений графиков. Предложен алгоритм нахождения предложенных оценок изображений графиков для автоматизации метода типовых таблиц.

Ключевые слова: изображение, управление, динамические характеристики, метод типовых таблиц.

Решение задач управления тесно связано с вопросами математического моделирования. Часто проводят большой объем экспериментов, тратят время и средства в целях получения динамических характеристик изучаемого процесса, при этом не всегда представляя себе, каков должен быть вид получаемых характеристик. Для решения задач идентификации и определения динамических характеристик при решении задач управления были собраны и систематизированы типовые функции, дающие представление о форме и характеристиках входных и выходных сигналов [1]. Рассмотрим процесс использования метода типовой идентификации. Если таблица достаточно подробно составлена, т.е. одному виду $r_{xx}(t)$ представлено в соответствие большое количество кривых $r_{yx}(t)$ и векторов параметров. Получив значения $r_{xx}^3(t)$ и $r_{yx}^3(t)$, соответствующие реальному объекту, исследователь отыскивает в таблице кривую $r_{xx}^T(t)$, наиболее близкую к $r_{xx}^3(t)$ (индекс «т» – табличная кривая, индекс «э» – экспериментальная кривая). Выбранная кривая $r_{xx}^T(t)$ выделяет из всей таблицы часть, которая содержит отклики $r_{yx}^T(t)$ достаточно широкого класса операторов на выбранное воздействие $r_{xx}^T(t)$. Выбирая далее из кривых $r_{yx}^T(t)$ кривую, наиболее близкую к $r_{yx}^3(t)$, исследователь находит вектор параметров – это оценка параметров реального объекта. Так как кривые $r_{yx}^T(t)$ и соответствующие

$r_{xx}^T(t)$ разбиты на группы, то сначала подыскивается наиболее близкая кривая, являющаяся обобщенным портретом кривых в группе, далее продолжается поиск внутри группы [2].

Применение метода идентификации по таблицам сильно упрощает решение задач представленной области. Следующим логичным шагом упрощения данного процесса является его автоматизация. В этом случае возникает не тривиальная задача, для решения которой требуется: определить оценки, по которым компьютер сможет сопоставить и сравнить графики, представленные в виде изображений в его внутренней памяти; разработать способ нахождения и выделения этих оценок машиной; разработать способ сравнения и сопоставления графиков по полученным критериям.

В ходе анализа были сформированы следующие критерии оценки изображений графиков: периоды монотонности; координаты крайних точек по оси абсцисс; координаты крайних точек по оси ординат; координаты точки перегиба функции.

Исходя из сформированных критериев синтезирован алгоритм сравнения. Первым шагом, если мы знаем периоды монотонности функций, количество у каждого из графиков, следовательно, сразу возможно сократить количество подходящих типовых графиков. Далее логичным будет сравнить знаки периодов монотонности, в ходе анализа графиков из типовых таблиц уже на этом шаге известно достаточно, чтобы отнести график в одну из групп. Третий шаг – сравнение координат точек перегиба функции, так как график, поступающий для поиска соответствий может быть растянут как по оси абсцисс, так и ординат, то следует учитывать это, для чего и необходимы координаты крайних точек по осям [3].

Разработанный алгоритм оценки изображений графиков корреляционных и автокорреляционных функций состоит из следующих этапов.

- Осуществляется поиск пар чисел координат начала и конца графика, так же формируется массив векторов, который описывает вершины графика.

- Формируется строка, изображающая поведение функции условными символами. Номер положения символа в строке описывает точку, находящуюся на той же позиции по оси абсцисс. Осуществляется поиск самой высокой и самой низкой точек графика.

- Рассчитывается расстояние между крайними точками графика, после чего в сформированной строке, описывающей поведение функции, исправляются искажения, связанные с тем, что изображения представляются в памяти компьютера матрицами и там, где челове-

ский глаз видит убывание или возрастание функции, соседние пиксели могут иметь одинаковую координату по оси ординат.

– Осуществляется поиск и формирование вектора пар точек перегибов функции.

Список литературы

1. Распознавание информационного процесса в системе поддержки принятия решений / В. В. Алексеев, Ю. В. Минин, Х. Д. Льюнг, С. Н. Сатышев // Научтехлидиздат, 2014. – С. 47 – 49.

2. Типовые линейные модели объектов управления: справ. пособие / С. А. Анисимов, И. С. Зайцева, Н. С. Райбман, А. А. Яралов. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 264 с.

3. Солопахо, А. В. Гарантированное оптимальное управление объектом, описанным системой дифференциальных уравнений со случайным параметром / А. В. Солопахо // Вестник Тамбовского государственного технического университета, 1995. – С. 239 – 245.

IDENTIFICATION OF GRAPHS OF CORRELATION AND CROSS-CORRELATION FUNCTIONS FOR DETERMINING THE CHARACTERISTICS OF AN OBJECT

D. N. Vorobyev, Yu. V. Minin, G. N. Nurutdinov
Tambov State Technical University, Tambov

Abstract. The work is devoted to the determination of the dynamic characteristics of a technical object on the basis of analysis of graphs of correlation and cross-correlation functions. Graphs of graphs are formed. An algorithm for finding proposed estimates of graph images for automating the method of type tables is proposed.

Keywords: image, control, dynamic characteristics, the method of type tables.

НОВЫЙ ПОДХОД И ЭКСПРЕСС-МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КИНЕТИЧЕСКИХ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ

Ю. И. Головин¹, А. И. Тюрин¹, Д. Ю. Головин¹,
А. А. Самодуров¹, А. Г. Дивин²

¹Научно-исследовательский институт «Нанотехнологии и
наноматериалы» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный
университет имени Г. Р. Державина», Тамбов

²ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный
технический университет», Тамбов
yugolovin@yandex.ru

Аннотация. Предложен и экспериментально апробирован новый нестационарный и неразрушающий экспресс-метод определения кинетических теплофизических свойств широкого спектра материалов (металлы, керамики, полимеры, композиты и др.) или изделий без вырезания из них образцов определенной формы.

Ключевые слова: кинетические теплофизические характеристики, точечный лазерный нагрев, температуропроводность, теплопроводность, тепловизор.

В настоящее время для измерения кинетических теплофизических характеристик (температуропроводности, теплопроводности и др.) наиболее часто используют метод лазерной вспышки [1 – 3]. Он был изобретен в 60-е годы XX века [1] и эффективно реализуется в серии научно-исследовательского и производственного оборудования (см. например, [4]), работающего в соответствии со стандартами ISO, ASTM и др. [5, 6]. Метод и оборудование имеют ряд несомненных достоинств – высокая точность и хорошая воспроизводимость результатов измерений, возможность контроля состава газовой среды и температуры в интервале от –120 до 2800 °С и др. Однако вместе с тем они обладают и рядом недостатков. Для исследования необходимо использовать только специально подготовленные образцы определенной формы. Метод требует доступа с двух сторон от исследуемого образца. Это не позволяет работать на массивных или не подготовленных специально образцах, а также готовых изделиях, находящихся в процессе эксплуатации или имеющих доступ только с одной стороны.

Цель настоящей работы – разработка не нуждающегося в пробоподготовке более универсального экспрессного метода определения

коэффициентов температуропроводности – χ и теплопроводности – λ различных материалов и изделий, не нуждающегося в двустороннем доступе к объекту.

Для определения χ , в отличие от [4], осуществляли локальный («точечный») импульсный нагрев сфокусированным лазерным пучком с последующей регистрацией эволюции распределения температуры на поверхности образца с помощью тепловизора. В качестве нагревателя был использован лазер мощностью 10 W с длиной волны 450 nm и регулируемой длительностью импульса. Цифровое ИК-изображение той же наружной поверхности получали с помощью тепловизора FLIR A35sc, обладающего наибольшей чувствительностью в диапазоне длин волн $\lambda = 7,5 - 13 \mu\text{m}$ (матрица 320×256 пикселей; угловое разрешение – 2,78 mrad; чувствительность ~0,05 °C, в диапазоне температур от – 20 °C до + 550 °C; частота выводимых и сохраняемых кадров – 60 Hz).

Разработаны 3D- и 2D-модели и алгоритмы, позволяющие из полученных термографических картин радиально-симметричного пространства теплового фронта в объемном или тонколистовом исследуемом образце определять коэффициенты температуропроводности – χ и теплопроводности – λ различных материалов и готовых изделий. Усреднение по углу и попиксельное вычитание из текущих значений сигнала с матрицы начального уровня сигнала позволило существенно подавить помехи и шумы различного происхождения.

Предложенным нестационарным экспресс-методом экспериментально определены величины χ и λ ряда материалов и готовых изделий (металлы – пластины из малоуглеродистой стали, нержавеющей стали, алюминия; керамики – массивная керамическая деталь из диоксида циркония; полимеры – фторопласт F4; композиты – гетинакс и др.). Исследования показали, что значения χ и λ , определенные предложенным методом, имеют малую дисперсию и совпадают в пределах погрешности (2 – 5%) с результатами измерений, проведенными на этих же материалах с использованием стандартных методик и требований ГОСТа [7] в стационарном режиме при заданном тепловом потоке.

Итак, в работе предложен новый экспрессный безобразцовый (не разрушающий) метод определения кинетических теплофизических характеристик в производственных условиях, как массивных объектов, так и тонких пластин, включая детали и элементы готовых изделий при одностороннем доступе к ним. Эксперимент показал, что определенные этим способом значения χ и λ с хорошей точностью совпадают с известными табличными значениями или значениями, измеренными независимо ГОСТированным методом.

Разработка новой методики для определения теплофизических характеристик и проведение экспериментальных исследований выполнены при поддержке гранта РФФИ (проект № 15-19-00181). Изготовление и отладка оригинального прибора выполнены при поддержке гранта Минобрнауки РФ (проект № 16.2100.2017/4.6). Разработка аналитических и численных моделей выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 17-48-680817). Экспериментальные результаты были получены на оборудовании ЦКП ТГУ им. Г. Р. Державина.

Список литературы

1. Parker W. J., Jenkins R. J., Butler C. P., Abbott G. L. // J. Appl. Phys. – 1961. – V. 32. – P. 1679 – 1684.
2. Materials Letters / L. Wang, M. Gandorfer, T. Selvam, W. Schwieger. – 2018. – V. 221. – P. 322 – 325.
3. Термографический контроль изделий новыми методами мульти-масштабного анализа нестационарных тепловых полей / Ю. И. Головин, А. И. Тюрин, Д. Ю. Головин, А. А. Самодуров // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2018. – Т. 84, № 6. – С. 23 – 33.
4. URL: http://granat-e.ru/netzsch_lfa-427.html
5. ISO 22007-4. Plastics – Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity. Part 4: Laser flash method.
6. ASTM E1461. Standard Test Method for Thermal Diffusivity by the Flash Method.
7. ГОСТ 23630.2–79. Пластмассы. Метод определения теплопроводности. Аппаратура, материалы и реактивы.

NEW APPROACH AND EXPRESS TECHNIQUE OF MEASURING MATERIAL KINETIC THERMAL-PHYSICAL PROPERTIES

**Yu. I. Golovin¹, A. I. Tyurin¹, D. Yu. Golovin¹,
A. A. Samodurov¹, A. G. Divin²**

¹*Research Institute Nanotechnologies and Nanomaterials,*

Derzhavin Tambov State University, Tambov

²*Tambov State Technical University, Tambov*

Abstract. New non-stationary non-destructive express technique for measuring kinetic thermal-physical properties of wide range of materials including metals, ceramics, polymers and composites has been proposed and experimentally approved. The technique does not require cutting material samples of specific shape.

Keywords: kinetic thermal-physical properties, local laser heating, temperature diffusivity, thermal camera.

К ЗАДАЧЕ СОЗДАНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ «УМНАЯ ТЕПЛИЦА»

К. А. Епифанова¹, Нурзула Есимова¹, Э. В. Роганова², Амури Саер²

¹ФГБОУ ВО ПензГТУ, Пенза

²ФГБОУ ВО ПГУАС, Пенза

FurcanIdlib, Сирия

Vladimir_roganov@mail.ru; roganelka@mail.ru;

Аннотация. Во главе угла при разработке теплиц и парников ставится требование обеспечения максимальной эргодичности. Это было связано с ориентацией на ручной труд с минимальным набором средств механизации. Современные условия требуют изменения традиционных подходов к выращиванию растений, из них основное – роботизация и автоматизация с учетом обязательного снижения себестоимости выращивания растений. Такая постановка вопроса требует изменения конструкций теплиц и парников с целью обеспечения возможности внедрять роботы, ориентированные на решение поставленных задач.

Ключевые слова: информационные технологии, оптимизация, bigdata, технологические процессы.

Разработанные теплицы и парники различных форм и конструкций [1] отличаются: размерами и материалами, из которых они изготовлены (пленка, стекло или поликарбонат); формой: пристенные (они же односкатные), двускатные, арочные, каплевидные [2]. Они разработаны с учетом предоставления максимального удобства человеку, который выращивает растения вручную. Исследования показывают, что с использованием АСУ ТП можно достичь значительно лучших результатов с использованием технологий BigData и выбор f оптимального соотношения питательных веществ, сорта, грунта, освещенности и климата. Данная статья посвящена исследованию возможности применения новых способов выращивания растений.

Среди теплиц наиболее распространена конструкция «Теплица домик», недостатками которой считался большой расход материалов [3] и фундамент [4]. Им на смену пришли поликарбонатные с двускатной крышей и арочные теплицы [5]. Такая конструкция считается одной из самых надежных и долговечных [6]. Их модернизацией являются каплевидные теплицы [7], выдерживающие снегопады, пропускающие свет и удерживающие тепло [8]. Разновидностью теплиц являются парники разной формы [9], например покрытые застекленными оконными рамами [11] или переносной парник [12]. Все рас-

смотренные виды конструкций защищенного грунта ориентированы на ручной труд. Внедрение роботов, средств механизации и автоматизации выращивания растений требует изменения конструкций. В частности необходимо решить вопрос с подводом приводов для обработки земли, систем полива растений без участия человека, управления освещением и микроклиматом.

Анализ показал, что поставленные вопросы о внедрении роботов [13], механизации и автоматизации актуальны и для стационарных крупных теплиц [14]. Анализ показал, что все виды имеющихся теплиц не рассчитаны на использование средств механизации и автоматизации технологических процессов [15, 16] выращивания растений. К таким средствам относятся: комплекс климатконтроля [15 – 19] (датчики освещенности; датчики температуры воздуха; датчики влажности; система освещения; система подогрева и охлаждения воздуха в теплице;

1. Анализ конструкций теплиц

Критерии оценки	Односкатные	Арочные	Двускатные	Капельные	Переносные парники
Простота сборки	Простая сборка, за счет того, что каркас опирается на стену	Состоит из дуг и продольных стоек. Сверху покрыта поликарбонатом	Сложная сборка. Включает множество элементов	Очень сложная сборка. Состоит из множества элементов	Простая сборка, за счет своей миниатюрности
Теплоизоляция	Отличная	Хорошая	Хорошая	Хорошая	Средняя
Освещенность	Плохая	Отличная	Отличная	Отличная	Отличная
Устойчивость к нагрузкам	Средняя	Плохая	Хорошая	Отличная	Плохая
Цена	Небольшая	Бюджетный вариант	Средняя	Средняя	Дешевле всего
Возможность автоматизации	Частичная	Практически невозможна	Сложность в установке	Сложность в установке	Легко установить автоматизацию

система автоматического полива); программно-аппаратный комплекс управления технологическим процессом выращивания растений (пульт управления; центральная вычислительная система; программное обеспечение; базы данных).

Цель ввода новых АСУ ТП – уменьшить долю ручного (наиболее дорогого) труда, ускорить рост растений, за счет чего добиться снижения себестоимости продукции, сделав ее конкурентоспособной в конкретном регионе. Тогда целевую функцию можно представить в виде:

$$Q = \sum_{i=1}^N x_i c_i \rightarrow \max,$$

где N – число видов сортов растений, выращиваемых в теплице; x_i – количество выращенного i -го продукта; c_i – стоимость выращенного i -го продукта.

Анализ показал, что поставленные задачи требуют изменения самих конструкций теплиц. Они должны быть удобными для размещения и обслуживания роботов, средств механизации и автоматизации, предполагающих уход за землей, создание микроклимата, и максимальную механизацию при посеве семян и сборе урожая. Второй особенностью новых комплексов должен быть удаленный доступ по отношению к возможности управления отдельными узлами умной теплицы, что уже реализовано, когда в качестве пульта управления используется сотовый телефон.

Список литературы

1. Интернет-ресурс: Конструкции теплиц. – URL: <http://www.freeseller.ru/2663-konstrukcii-teplic.html> / (Дата обращения: 18.09.2017).
2. Ремонт, А. П. Информационно-измерительные и диагностические системы, некоторые аспекты отображения информации / А. П. Ремонт // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления: сб. матер. XI науч.-техн. конф. – 1999. – С. 160 – 164.
3. Середкин, А. Н. Основы защиты информации и информационные технологии / А. Н. Середкин, В. Р. Роганов, В. О. Филиппенко. – Пенза: Изд-во ПензГТУ, 2013. – 344 С.
4. Описание биологической обратной связи с использованием элементов теории автоматического управления / Б. А. Истомин, С. А. Иванов, А. В. Герасименко, В. Р. Роганов, В. В. Истомин, Т. В. Истомина // Современные технологии и развитие политехнического образования: сборник. – 2016. – С. 711 – 714.
5. Улучшение оперативного планирования маневровой работы на путях необщего пользования / Т. А. Нечай, Т. А. Герасименко, А. В. Герасименко,

В. Р. Роганов // Современные технологии и развитие политехнического образования: сборник. – 2016. – С. 992 – 996.

6. Епифанова, К. А. Информационные модели дополненной реальности в задачах построения тренажеров / К. А. Епифанова // Теория и практика имитационного моделирования и создания тренажеров: сборник. – Пенза. – 2015. – Т. 1. – С. 54 – 58

7. Епифанова, К. А. Система автоматического климат-контроля умной теплицы / К. А. Епифанова, В. Р. Роганов // Теория и практика имитационного моделирования и создания тренажеров: сб. ст. междунар. конф. – Пенза. – 2016. – С. 70 – 78.

8. Епифанова, К. А. Технология управления роботехническими системами на платформе Android через технологию Bluetooth / К. А. Епифанова, Т. В. Жашкова, М. Ю. Михеев // Современные информационные технологии. – 2016. – № 23 (23). – С. 98 – 100.

9. Роганов, В. Р. By solving the problem of providing the necessary quality of the model of the surrounding space / В. Р. Роганов // Современные информационные технологии. – 2015. – № 22 (22). – С. 7 – 13.

10. Жашкова, Т. В. Интеллектуальные системы и технологии: учеб.-метод. пособие. Ч. 1 / Т. В. Жашкова, М. Ю. Михеев, В. Р. Роганов. – Пенза: Изд-во ПензГТУ, 2015. – 63 С.

11. Роганов, В. Р. Сравнительный анализ систем имитации визуальной обстановки / В. Р. Роганов, В. О. Филиппенко // Современные информационные технологии. – 2014. – № 19. – С. 162 – 166.

12. Роганов, В. Р. Концепция развития робототехники в Пензенской области / В. Р. Роганов // Робототехника и системный анализ: сб. тр. международной научно-практической молодежной конференции. – Пенза: ПензГТУ, 2015. – Вып. 1. – С. 5 – 8.

13. Роганов, В. Р. Анализ развития программы Робототехника с учетом опыта ее продвижения в средних образовательных учреждениях Пензенской области / В. Р. Роганов // Робототехника и системный анализ: сб. тр. международной научно-практической молодежной конференции. – Пенза: ПензГТУ, 2015. – Вып 1. – С. 9 – 13.

14. Сазанов, Д. Э. Проблемы построения систем управления микроклиматом индивидуальных теплиц / Д. Э. Сазанов, В. Я. Баннов, В. А. Трусов, Н. К. Юрков // Современные информационные технологии. – 2014. – № 19. – С. 272 – 277.

15. Михеев, М. Ю. Синтез обобщенных информационно-логических и математических моделей состояний и процессов в сложных эргатических системах / М. Ю. Михеев, А. А. Лепешев, К. Н. Лысенко // Современные информационные технологии. – 2016. – № 23 (23). – С. 36 – 40.

16. Прокопенко, Н. Н. Архитектура и схемотехника аналоговых микросхем с собственной и взаимной компенсацией импедансов / Н. Н. Прокопенко, Н. В. Ковбасюк // Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса.– Шахты. – 2007. – 325 с.

17. Prokopenko, N. N. “Architecture of the microwave differential operating amplifiers with paraphrase output” in International Conference on Signals and Elec-

tronic Systems, ICSES'10 Conference Proceeding. sponsors: Rector of Silesian University of Technology, Polish Ministry of Science and Higher Education, Gliwice City Mayor, Evatronix S. A. / N. N. Prokopenko, P. S. Budyakov, A. I. Serebryakov. – 2010. – P. 165 – 168.

18. Прокопенко, Н. Н. Схемотехника широкополосных усилителей: монография / Н. Н. Прокопенко, Н. В. Ковбасюк. Федер. агентство по образованию, Гос. образоват. учреждение высш. проф. образования Юж.-Рос. гос. ун-т экономики и сервиса. – Шахты, 2005. – 217 с.

19. Prokopenko, N. N. “The bifet-technology voltage analog multipliers based on the radiation resistant abmc «Integral»” in International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON-2009; Proceedings International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON-2009. sponsors: Russian Found. Basic Res. RBFР proj. 09-07-06004, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Radar R and D / N. N. Prokopenko, A. I. Serebryakov, D. N. Konev. – Tomsk, 2009. – P. 244 – 248.

TO THE PROBLEM OF CREATION OF ROBOTICIZED COMPLEXES “SMART GREENHOUSE”

К. А. Epifanova¹, Nurzula Yesimov¹, E. V. Roganova², Amouri Saer²

¹*Department “Information technology systems” FGBOU PenzSTU,
Penza*

²*Department “Information-computing systems” FGBOU PGUAS,
Penza*

Furcan Idlib, Syria

Abstract. At the forefront of the development of greenhouses and greenhouses put the requirement to ensure maximum ergodicity. This was due to the orientation toward manual labor. Modern conditions require a change in the traditional approaches to plant growing, of which the main one is robotization and automation, taking into account the mandatory reduction in the cost of growing plants. This formulation of the problem requires a change in the design of greenhouses and greenhouses in order to provide the possibility to introduce robots that are oriented towards the solution of the tasks.

Keywords: information technologies, optimization, big data, technological processes.

References

1. Internet resource: Construction of greenhouses. – URL: <http://www.freeseller.ru/2663-konstrukcii-teplic.html> / (Date of circulation: 18.09.2017).

2. Remontov, A. P. Information-measuring and diagnostic systems, some aspects of information display // In the collection of Sensors and information converters of measurement, control and management systems: mater. XI scientific-techn. Conf. / A. P. Remontov. – 1999. – P. 160 – 164.

3. Seryodkin, A. N. Fundamentals of information security and information technology. – Penza: Penza State Technical University / A. N. Seryodkin, V. R. Roganov, V. O. Filippenko. – 2013. – 344 p.
4. Description of the biological feedback using the elements of the theory of automatic control // In the collection: Modern technologies and the development of polytechnical education. Scientific electronic publication / B. A. Istomin, S. A. Ivanov, A. V. Gerasimenko, V. R. Roganov, V. V. Istomin, T. V. Istomina. – 2016. – P. 711 – 714.
5. Improving the operational planning of shunting work on the routes of non-public use // In the collection: Modern technologies and the development of polytechnic education. Scientific electronic publication / T. A. Nechai, T. A. Gerasimenko, A. V. Gerasimenko, V. R. Roganov. – 2016. – P. 992 – 996.
6. Epifanova, K. A. Informational models of augmented reality in the tasks of constructing simulators // In the collection: Theory and practice of simulation and creation of simulators Penza / K. A. Epifanova. – 2015. – V. 1. – P. 54 – 58.
7. Epifanova, K. A. System of automatic climate control of a smart greenhouse // Collected articles of the international conference “Theory and practice of simulation and simulators creation” / K. A. Epifanova, V. R. Roganov. – Penza, 2016. – P. 70 – 78.
8. Epifanova, K. A. Technology management robotic systems on the Android platform via Bluetooth technology / Modern information technology / K. A. Epifanova, T. V. Zhashkova, M. Yu. Mikheev. – 2016. – N 23 (23). – P. 98 – 100.
9. Roganov, V. R. Modern Information Technologies / V. R. Roganov. – 2015. – N 22 (22). – P. 7 – 13.
10. Zhashkova, T. V. Intellectual systems and technologies: the teaching method. allowance. P. 1 / T. V. Zhashkova, M. Yu. Mikheev, V. R. Roganov. – Penza: Penza State Technical University, 2015. – 63 p.
11. Roganov, V. R. Comparative analysis of visual imitation systems / Modern information technologies / V. R. Roganov, V.O. Filippenko. – 2014. – N 19. – P. 162 – 166.
12. Roganov, V. R. The concept of development of robotics in the Penza region / V. R. Roganov // In: Robotics and systems analysis. Proceedings of the international scientific and practical youth conference. – Penza: PenzSTU, 2015. – Is. 1. – P. 5 – 8.
13. Roganov, V. R. Analysis of the development of the Robotics program taking into account the experience of its promotion in secondary educational institutions of the Penza region / V. R. Roganov // In: Robotics and systems analysis. International Proceedings.scientific and practical youth conference. – Penza: PenzSTU, 2015. – Is. 1. – P. 9 – 13.
14. Problems of construction of microclimate control systems for individual greenhouses / D. E. Sazanov, V. Ya. Bannov, V. A. Trusov, N. K. Yurkov // Modern information technologies. – 2014. – N 19. – P. 272 – 277.
15. Mikheev, M. Yu. Synthesis of generalized information-logical and mathematical models of states and processes in complex ergatic systems / M. Yu. Mikheev.

heev, A. A. Lepeshev, K. N. Lysenko // Modern information technologies. – 2016. – N 23 (23). – P. 36 – 40.

16. Prokopenko, N. N. Architecture and circuitry of analog microcircuits with intrinsic and mutual compensation of impedances / N. N. Prokopenko, N. V. Kovbasyuk // South-Russian State University of Economics and Service. Shakhty, 2007. – 325 p.

17. Prokopenko, N. N. “Architecture of the microwave differential operating amplifiers with paraphrase output” in International Conference on Signals and Electronic Systems, ICSES'10 Conference Proceeding. sponsors: Rector of Silesian University of Technology, Polish Ministry of Science and Higher Education, Gliwice City Mayor, S. A. Evatronix / N. N. Prokopenko, P. S. Budyakov, A. I. Serebryakov. – 2010. – P. 165 – 168.

18. Prokopenko, N. N. Circuitry of broadband amplifiers.monograph / N. N. Prokopenko, N. V. Kovbasyuk // Feder. Education Agency, Gos.educated. institution of higher education. prof. Education South-Russian. state. un-t economy and service. – Shakhty, 2005. – 217 p.

19. Prokopenko, N. N. “The bifet-technology voltage analog multipliers based on the radiation resistant abmc «Integral»” in International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON-2009; ProceedingsInternational Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON-2009. sponsors: Russian Found. Basic Res. RBFR proj. 09-07-06004, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Radar R and D / N. N. Prokopenko, A. I. Serebryakov, D. N. Konev. – Tomsk, 2009. – P. 244 – 248.

КОНЦЕПЦИЯ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ЦИФРОВОГО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

А. И. Завражнов¹, Я. П. Лобачевский², А. А. Завражнов³,
В. Ю. Ланцев¹

¹ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет»
(ФГБОУ ВО «Мичуринский ГАУ»)

²Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»
(ФГБНУ «ФНАЦ ВИМ»)

³Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный научный центр имени И. В. Мичурина»
(ФГБНУ «ФНЦ им. И. В. Мичурина»)

Аннотация. Авторами статьи сформированы основополагающие концепции и принципы, определяющие научно-технологический облик современного промышленного садоводства. Реализация представленных концепций, принципов и задач позволит создать интеллектуальную техническую систему, осуществляющую в автоматическом режиме анализ информации о состоянии агробиоценоза сада, принятие управленческих решений и их реализацию роботизированными техническими средствами.

Ключевые слова: цифровое сельское хозяйство, «Умный Сад», интеллектуальное производство, локальный мониторинг, роботизированные мобильные комплексы.

Актуальность разработки концепции развития цифрового сельского хозяйства определяется следующими требованиями:

– в современном мире уровень развития цифровых технологий играет определяющую роль в конкурентоспособности стран. Переход к цифровой экономике рассматривается в качестве ключевой движущей силы экономического роста;

– по оценке Минсельхоза России «использование цифровых технологий в АПК» позволяет повысить рентабельность сельхозпроизводства за счет точечной оптимизации затрат и более эффективного распределения средств. Внедрение цифровой экономики позволяет снизить расходы не менее чем на 23% при внедрении комплексного подхода».

При разработке концепции необходимо учитывать следующие проблемы, существующие в современном сельском хозяйстве:

– низкую рентабельность производства сельскохозяйственной продукции;

- низкую степень автоматизации, роботизации;
- высокую зависимость сельского хозяйства от человека (человеческий фактор);
- высокую зависимость сельского хозяйства от климатических условий (погода).

Решение указанных проблем позволит достигнуть выполнения следующей цели: увеличение вклада отрасли в экономику Российской Федерации, рост экспортной выручки, создание, диспетчеризация и агрегация потоков данных для создания сквозных цепочек и технологий от производства сельхозпродукции до потребления с глубокой интеграцией в смежные отрасли цифровой экономики для повышения производительности труда в сельском хозяйстве и максимизации прибыли предприятий отрасли.

Для достижения названной цели необходимо решить следующие задачи:

1) создание цифровых методов, технологий, технических средств, обеспечивающих мониторинг полей, сбор цифровых данных о растениях, животных и полезных микроорганизмах, цифровых методов составления и обновления почвенных карт, методов актуализации и использования селекционного и генетического материала;

2) внедрение цифровых инструментов для использования информационных ресурсов, платформ и технологий на сельхозобъектах, повышающих эффективность сельскохозяйственного производства;

3) создание технологий и технических средств для автоматизации, роботизации и интеллектуального сельскохозяйственного производства;

4) разработка специализированного программного обеспечения для сельскохозяйственных платформ и управления «умным сельским хозяйством»;

5) обеспечение участков сельхозпроизводства системой управления и диагностики сельхозтехники и средствами объективного контроля, инструментами планирования и управления производством с элементами BigData;

6) создание технологий, упрощающих процесс документооборота между государственными структурами, сельхозтоваропроизводителями, фермерами, потребителями сельхозпродукции;

7) использование финансово-регуляторных инструментов контроля сезонных спадов и инструментов управления логистикой и транспортом;

8) развитие специализированного аграрного образования для Цифрового сельского хозяйства;

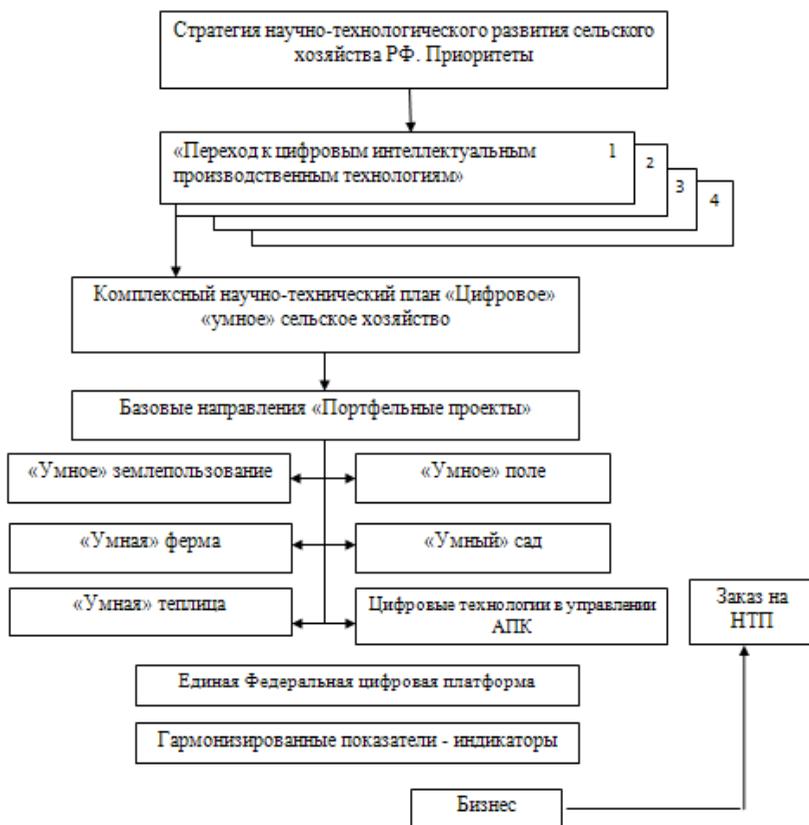
9) повышение конкурентоспособности экспортной сельхозпродукции, в том числе, для стандартов ВТО;

10) внедрение технологий «интернета вещей», блокчейн и других для всего набора сельскохозяйственной техники, наземных, водных и воздушных, стационарных и нестационарных объектов;

11) разработка эффективной цифровой системы планирования внесения удобрений и химикатов с учетом актуальной почвенной и метеорологической информации;

12) обеспечение высокоскоростной связи для сельских территорий, стандартизация форматов и протокола обмена данными между информационными системами управления;

13) взаимосвязь с Государственными программами Российской Федерации: ФНТП, КНТП, НТИ и др.



Реализация концепции может включать несколько этапов:

- совершенствование нормативно-правовой базы освоения цифровых технологий;
- развитие информационной инфраструктуры в сельской местности и обеспечение информационной безопасности;
- разработка и создание системы геоинформационного мониторинга агропромышленного производства;
- разработка и создание интеллектуальной системы поддержки принятия решений сельхозпроизводителями;
- разработка и создание интеллектуальных роботизированных средств агропромышленного производства;
- разработка и создание единых каналов связи для обмена информацией;
- кадровое обеспечение цифрового агропромышленного производства;
- трансфер технологий, коммерциализация результатов научно-технической деятельности.

«Умная» среда – это наличие (оснащение) сенсорного и информационного инструментария, позволяющего оперативно (ментально) собирать, передавать и аккумулировать информацию об окружающей действительности (среде).

«Интеллектуальная» среда – это возможность анализа и принятия решения в управляющих процедурах изменения окружающей деятельности (среды).

«Умный Сад».

Цель: разработка интеллектуальной технической системы, осуществляющей в автоматическом режиме анализ информации о состоянии агробиоценоза сада, принятие управленческих решений и их реализация роботизированными техническими средствами.

Задачи:

- разработка цифровых систем для сбора и анализа данных о состоянии почв, растений и окружающей среды с применением облачных технологий и технологий «интернета вещей»;
- разработка информационной системы и технических средств для мониторинга и оперативного получения данных об изменениях состояния сада и окружающей среды;
- разработка унифицированных средств передачи данных с учетом специфики садоводства;
- разработка системного программного обеспечения, позволяющего автоматически управлять сбором и анализом информации с датчиков, осуществлять ее анализ, систематизацию, принятие решений по управлению технологическими процессами;

- разработка машинных технологий с применением роботизированных (в том числе, беспилотных) технических средств для реализации управляющих воздействий в системе цифрового садоводства в автоматическом режиме.

Целевые индикаторы:

- не менее 90% площадей сельскохозяйственных многолетних насаждений в оцифрованном виде в Единой геоинформационной системе;

- не менее 70% площадей промышленных садов должны быть обеспечены средствами сбора данных о состоянии почв, растений и окружающей среды;

- не менее 50% площадей промышленных садов должны быть покрыты сетью передачи данных для обеспечения сбора Больших Данных и технологий «интернета вещей» в плодородстве;

- не менее 70% мобильных технических средств будут оснащены системами мониторинга и включены в Единую геоинформационную систему;

- не менее 20% технических средств будут роботизированными и работать полностью в автономном режиме без участия человека.

Однако реализация промышленного садоводства как высокотехнологичной индустриальной отрасли сдерживается рядом причин, таких как:

- продолжительные по времени жизненными циклами вегетационных, технологических и производственных процессов (жизненные циклы плодов продукции в целом имеют продолжительность до 2 лет, жизненные циклы промышленных садов имеют продолжительность до 40 – 50 лет для экстенсивных садов и до 15 лет для интенсивных и суперинтенсивных садов);

- спецификой инженерного обеспечения, определяющей весьма широкий ассортимент машин и оборудования для выполнения технологических процессов и операций, ограниченность по объему партии;

- историческими и национальными особенностями отечественного садоводства, связанного, главным образом с агробиологическими, агротехнологическими и продукционными особенностями садов;

- демографической и кадровой ситуацией, определяющей острую нехватку квалифицированных работников, имеющих знания и опыт работы в сфере передовых производственных технологий.

В основе реализации проекта «Умный Сад» лежат следующие основополагающие концепции и принципы.

1. Известно, что в основе интеллектуального («умного») производства лежат разветвленные сенсорные сети. Для растениеводства в

общем и садоводства в частности – это система комплексного мониторинга, оснащенная датчиками и анализаторами контактного и бесконтактного действия.

2. В основе принятой модели «умного» производства в садоводстве принята концепция использования микроскопических сенсоров (датчиков и чипов) контактного действия и лазерно-оптических сенсоры бесконтактного действия, которые обеспечат проведение непрерывного комплексного мониторинга на локальном уровне.

3. Локальный уровень мониторинга и фитодиагностики позволит контролировать состояние каждого плодового растения (саженца или дерева) в отдельности, учитывать его потребность во влаге, элементах питания, знать наличие патогенов и вирусов, заболеваемость на всем протяжении его жизненного цикла.

4. Новая система локального мониторинга определяет методику 3Д-сканирования всего плодового растения путем размещения или позиционирования датчиков в его различных частях (в диапазоне корневой системы, штамба и разных участков кроны).

5. Принцип локального мониторинга также распространяется на периоды «индукции» и «инициации» почек плодового растения и позволяет проводить мониторинг соотношения листовой массы и плодов, что в итоге позволит управлять периодичностью плодоношения.

6. Локальные сенсорные технологии подразумевают при этом широкое использование роботизированных мобильных платформ и манипуляторов. Причем, следует отметить, что современный интенсивный сад полностью позволяет использовать данное оборудование со значительным энергосбережением путем использования уже установленных шпалер.

7. Использование «шпалерной инфраструктуры» при использовании роботизированных систем позволяет перейти к «безлюдным технологиям» на большинстве технологических операций в промышленном садоводстве.

8. Следует отметить, что в отличие от сенсорных технологий «точного земледелия», получивших наибольшее распространение в полеводстве, и анализируя участки в диапазоне 0,3...30 га, технология локального мониторинга оперирует с каждым плодовым растением индивидуально в линейных диапазонах 0,001...1 м, что значительно повышает точность и эффективность управления его продукционными и биологическими процессами.

9. Модель (сценарий) развития систем локального мониторинга в представленном проекте подразумевает несколько вариантов развития:

– использование мобильных роботизированных платформ (роботов-разведчиков) с системой датчиков и анализаторов, установленных

на роботы-манипуляторы для локального мониторинга в пределах плодового квартала (сада) или 3D-сканирования каждого плодового растения в отдельности;

– использование шпалер-сенсоров с мультидатчиками, установленных в разных частях плодового квартала (сада);

– использование вживленных датчиков-чипов в различных частях плодового растения, что позволит в будущем перейти к технологиям «самомониторинга/самодиагностики плодовых растений» и автоматизированному управлению фитосостояния каждого плодового растения в отдельности.

Обмен данными и управление системами локального мониторинга, технологическими и производственными процессами осуществляется на основе «интернета вещей», облачных вычислений, семантической, структурной и технической интероперабельности.

Использование технологий локального мониторинга с использованием элементов робототехники обозначено авторами проекта как «Умный Сад».

Анализ и интеллектуальное управление технологическими и производственными процессами «Умного Сада» осуществляется на основе цифровой и виртуальной моделей. Модель «Цифрового Сада» определяет кортежи цифровых аналогов плодовых кварталов (садов) и непосредственно цифровых аналогов плодового растения на всех этапах жизненного цикла. Модель «Виртуального Сада» определяет объединение в единую сеть всех этапов технологических и производственных процессов. Продуктом «Виртуального Сада» является виртуальная модель всех производственных, технологических, производственных, организационных и логистических процессов производства и реализации плодовой продукции.

Первым шагом в реализации данного направления является организация испытательного полигона «Умного сада», где будут отработаны новые принципы цифровой трансформации в отрасли промышленного садоводства и тиражирования во всех садоводческих регионах России.

Список литературы

1. Завражнов, А. А. Синергетические принципы построения машинных технологий для интенсивного садоводства / А. А. Завражнов, В. Ю. Ланцев // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК: материалы V Междунар. науч.-практ. конф. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2011. – С. 358 – 370.

2. Завражнов, А. И. Реализация инженерного обеспечения отечественного промышленного садоводства в формате “Unit production” и международных

стандартов ISO / А. И. Завражных, А. А. Завражных, В. Ю. Ланцев // Достижения науки и техники АПК. – 2016. – Т. 30, № 3. – С. 77 – 80.

3. Завражных, А. И. Система стандартов ISO в мелкосерийном производстве садовой техники / А. И. Завражных, А. А. Завражных // Задачи МИС Минсельхоза России в технической и технологической модернизации сельскохозяйственного производства. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2012. – С. 102 – 108.

4. Осипов, В. С. Переход к цифровому сельскому хозяйству: предпосылки, дорожная карта и возможные следствия / В. С. Осипов, А. В. Боговиз // Экономика сельского хозяйства России. – 2017. – № 10. – С. 11 – 15.

5. Черкашина, Л. В. Цифровые технологии в сельском хозяйстве / Л. В. Черкашина, Л. А. Морозова // Инновационное научно-образовательное обеспечение агропромышленного комплекса: материалы 69-й Междунар. науч.-практ. конф. – Рязань: Рязанский ГАТУ им. П. А. Костычева. – 2018. – С. 424 – 428.

6. Шапорова, З. Е. Цифровизация в сельском хозяйстве – прорыв в будущее / З. Е. Шапорова, Н. В. Титовская // Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития: материалы Международной науч.-практ. конф. – Красноярский ГАУ, 2018. – С. 96 – 98.

7. Modern industrial horticulture as the managed information and technological system / A. I. Zavrazhnov, A. A. Zavrazhnov, V. Y. Lantcev, Y. V. Trunov // Ecology, Environment and Conservation. – V. 22. – Dec. 2016. – Suppl. – P. 173 – 177.

CONCEPT OF SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT DIGITAL AGRICULTURE

A. I. Zavrazhnov¹, I. P. Lobachevsky², A. A. Zavrazhnov,
V. Yu. Lantcev³

¹*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Michurinsky State Agrarian University” (Michurinsky SAU)*

²*Federal State Budgetary Institution “Federal Scientific
and Agroengineering Center VIM” (FSBI FNATS VIM)*

³*Federal State Budgetary Scientific Institution
“I. V. Michurin Federal Scientific Center” (FSSI “I. V. Michurin FSC”)*

Annotation. The authors of the article have formed fundamental concepts and principles that determine the scientific and technological image of modern industrial gardening. The implementation of the presented concepts, principles and tasks will allow the creation of an intelligent technical system that automatically analyzes information on the state of agrobiocenosis of the garden, makes management decisions and implements them using robotic technical means.

Keywords: digital agriculture, Smart Garden, intellectual production, local monitoring, robotic mobile complexes.

УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ МИКРОСХЕМ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В. К. Зольников¹, В. П. Крюков², А. Ю. Кулай¹,
И. И. Струков¹, М. В. Солодилов¹, С. А. Евдокимова¹,
Т. В. Скворцова¹, А. И. Яньков²

¹*ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический
университет имени Г. Ф. Морозова», Воронеж*

²*АО «Научно-исследовательский институт электронной техники»,
Воронеж
wkz@rambler.ru*

Аннотация. Рассмотрены вопросы создания современной микроэлектроники специального назначения. Определены тенденции ее развития и их влияние на радиационную стойкость. Показаны основные физические явления, которые стали доминировать среди радиационных эффектов в последнее время.

Ключевые слова: микросхема, радиационное воздействие, микроэлектроника, СБИС, радиоэлектронная промышленность.

Процесс создания современной микроэлектроники достаточно сложен и трудоемок. Развитие микроэлектроники в последние 30 лет характеризуется следующими основными тенденциями. Число транзисторов на кристалле интегральной схемы (ИС) увеличивается в 4 раза каждые три года. Диаметр пластин удваивается каждые 15 лет. Площадь кристалла ИС увеличивается в 2, 3 раза каждые 6 лет. Стоимость производства удваивается каждые три года. Проектные нормы уменьшаются в 2 раза за каждые 6 лет. Внедряются новые методы проектирования с использованием сложно функциональных блоков (СФ-блоков) [1 – 7].

Рассматривая микроэлектронику, следует отметить, что уменьшение проектных норм существенным образом влияет на радиационную стойкость. Стали проявляться и оказывать существенное влияние на работу микросхемы физические явления, которые ранее не проявлялись. Поэтому в настоящее время методы моделирования радиационных эффектов и методы тестирования на радиационную стойкость требуют существенной коррекции. Тактико-технические требования, предъявляемые к микроэлектронике, могут быть достигнуты только на основе применения радиационно стойкой элементной базы. При этом

основной технологией производства ИС является КМОП-технология, которая обеспечивает уникальные интегральные показатели: широкий спектр функциональных возможностей, высокую производительность и быстродействие, низкую потребляемую мощность, простоту изготовления и другие преимущества. Однако в плане радиационной стойкости характеристики КМОП ИС уступают биполярным микросхемам [4].

Рассмотрим виды радиационного воздействия и эффекты, которые они оказывают на СБИС космического назначения более подробно.

Космическое излучение образовано галактическими космическими лучами и космическим излучением Солнца. Галактические космические лучи – элементарные частицы и ядра атомов, родившиеся и ускоренные до высоких энергий во Вселенной. Излучение Солнца возникает при интенсивных хромосомных вспышках.

Химический спектр галактических космических лучей в пересчете энергии на нуклон более чем на 94% состоит из протонов, еще на 4% – из ядер гелия (альфа-частиц). Есть также ядра других элементов, но их доля значительно меньше. В пересчете энергии на частицу доля протонов составляет около 35%, доля тяжелых ядер соответственно больше. Плотность потока этих частиц составляет примерно $1\text{E}-5$ част/см², что обеспечивает поглощенную дозу в объекте не более $1\text{E}-50$ рад в год. Космические лучи являются составляющей естественной радиации (фоновой радиации) на поверхности земли и в атмосфере.

Солнечное космическое излучение наблюдается только в период солнечной активности (вспышек). Средняя длительность вспышки равна одним суткам. Солнечное космическое излучение состоит в основном из протонов (85...97%), альфа-частиц (3...15%) и небольшого количества более тяжелых ядер. По сравнению с галактическими космическими лучами солнечные космические лучи имеют значительно меньше энергии частиц, но плотность потока во много раз превышает плотность потока галактических частиц. Максимально возможные поглощенные дозы на поверхности объекта могут составлять за год $10^3 \dots 10^4$ рад.

Воздействие факторов космического пространства можно разделить на две составляющие: первая связана с долговременными изменениями параметров, вторая характеризуется возникновением локальных эффектов или одиночных событий.

Для первой составляющей необходимо рассчитать дозу, поглощенную кристаллом кремния от воздействия электронного и протонного излучения, эффективность которой должна соответствовать поглощенной дозе гамма-излучения, и далее проводить расчет, как и в случае гамма-излучения. Это соответствует подходу комплекса государственных стандартов «Климат-7».

К локальным эффектам относят одиночные события. Одиночные события (ОС) – радиационные эффекты, причиной возникновения которых является взаимодействие отдельной (одной) ядерной частицы с активной областью прибора. Данные эффекты относятся к новому классу микродозиметрических радиационных эффектов в электронных приборах и носят принципиально вероятностный характер.

Основными радиационными эффектами в КМОП СБИС при воздействии фактором космического излучения являются эффекты ионизации и долговременные эффекты смещения. Следствием этих эффектов является деградация электрических и функциональных характеристик вследствие накопления радиационно-индуцированного заряда в диэлектрических структурах.

Список литературы

1. Автоматизация управления и проектирования в электронной промышленности [Текст]: монография / Ю. К. Фортинский, В. Е. Межов, В. К. Зольников, П. П. Куцько. – Воронеж: ВГУ, 2008. – 275 с.
2. Анциферова, В. И. Анализ подготовки специалистов по радиоэлектронике для научно-производственных и коммерческих структур в современных условиях [Текст] / В. И. Анциферова, В. К. Зольников // Моделирование систем и процессов. – 2009. – № 3-4. – С. 5 – 12.
3. Зольников, В. К. Математическое обеспечение учета импульсного излучения в САПР сквозного проектирования СБИС [Текст] / В. К. Зольников // Системы управления и информационные технологии. – 2009. – Т. 35, № 1.2. – С. 242 – 244.
4. Создание базиса для микросхем сбора и обработки данных / В. А. Скляр, А. В. Ачкасов, К. В. Зольников, И. И. Струков, К. А. Чубур // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 2. – С. 66 – 71.
5. Защита микропроцессоров от одиночных сбоев / В. А. Смерек, В. М. Антимиров, А. Ю. Кулай, А. Л. Савченко // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 2. – С. 71 – 77.
6. Уткин, Д. М. Оценка надежности программно-технических комплексов специального назначения / Д. М. Уткин, В. К. Зольников // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 2. – С. 78 – 84.
7. Информационные модели радиационных эффектов для оценки адекватности принятия решений / К. В. Зольников, В. М. Антимиров, А. Ю. Кулай,

И. И. Струков, М. В. Солодилов, К. А. Чубур // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 15 – 20.

8. Архитектура нейропроцессоров для систем автоматического управления подвижными объектами / В. М. Антимиров, В. К. Зольников, В. В. Лавлинский, В. П. Крюков, А. Ю. Кулай, А. Л. Савченко // Моделирование систем и процессов. – 2017. – Т. 10, № 4. – С. 4 – 10.

CONDITIONS OF OPERATION OF THE CIRCUITS FOR SPACE APPLICATIONS

V. K. Zolnikov¹, V. P. Kryukov², A. Y. Kulai¹, I. I. Strukov¹,
M. V. Solodilov¹, S. A. Evdokimova¹, T. V. Skvortsova¹, A. I. Yan'kov²

¹*Voronezh State Forestry Engineering University
named after G. F. Morozov, Voronezh*

²*Research Institute of Electronic Technology, Voronezh*

Abstract. The questions of creation of modern microelectronics of special purpose are considered. The tendencies of its development and their influence on radiation resistance are determined. The main physical phenomena that have become dominant among radiation effects in recent times are shown.

Keywords: microcircuit, radiation effect, microelectronics, VLSI, electronic industry.

ЭЛЕКТРОННАЯ КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В. К. Зольников¹, А. Ю. Кулай¹, В. П. Крюков², С. А. Евдокимова¹,
Т. В. Скворцова¹, А. И. Яньков²

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический
университет имени Г. Ф. Морозова», Россия, Воронеж

²АО «Научно-исследовательский институт электронной техники»,
Воронеж
wkz@rambler.ru

Аннотация. Рассмотрено современное состояние радиоэлектронной промышленности. Приведены основные перспективные направления научных и практических разработок.

Ключевые слова: электронное устройство, элементная база, микросхема, электронная промышленность, системы связи и управления.

Применение и использование различных радиоэлектронных устройств определяются главным образом параметрами используемой в них элементной базы: степенью интеграции, быстродействием, функциональными возможностями, потребляемой мощностью, массогабаритными показателями, надежностью и стойкостью к внешним факторам, стоимостью и т.п.

Изделия микроэлектроники, обладающие повышенной надежностью и стойкостью, используются практически во всех классах и группах аппаратуры, заказываемых предприятиями и департаментами, и количество микросхем и их номенклатура будут увеличиваться в геометрической прогрессии. Кроме того, очевидна тенденция к преобладанию в номенклатуре ИС большой и сверхбольшой степени интеграции (БИС и СБИС) [1 – 5].

Одной из важнейших задач является задача обеспечения надежности и стойкости к специальным факторам разрабатываемых изделий. С этой целью проводятся работы по совершенствованию средств проектирования, созданию новых схмотехнических и конструктивных решений, которые обеспечивали данные характеристики [5 – 9].

В первую очередь можно отметить существенный вклад в развитие методологии, моделей и алгоритмов иерархического моделирования

ния; методов и алгоритмов экспресс-анализа электронных узлов на тестопригодность на начальных этапах их проектирования; методов и алгоритмов верификации логики, моделирования неисправностей и автоматизированной генерации тестов; моделей и алгоритмов схемотехнического моделирования; методологии, моделей и алгоритмов моделирования воздействия радиации на параметры микросхем; структурной оптимизации системо- и схемотехнического базиса; методов и алгоритмов конструкторского проектирования.

Развитие технологий средств проектирования, материально-техническое обеспечения быстрыми темпами привели к созданию нового объекта – «система на кристалле» (СнК). Рассматривая ЭКБ, можно сказать, что первоначально «системы на кристалле» возникли как совокупность нескольких микросхем, которые представляли собой отдельные компоненты, а объединение осуществлялось на уровне обмена данными. В то время они назывались «системы в кремнии», но фактически это не была «система», а лишь набор отдельных микросхем. Только с развитием методов проектирования, глубокой интеграции таких микросхем закрепилось название «система на кристалле».

В дальнейшем такие разработки приобрели роль «системы». Она представляет собой сложную интегральную схему, интегрирующую в себе все основные функциональные элементы системы в одном корпусе. В настоящее время СнК получили такое развитие, что уже практически невозможно провести границу между электронным компонентом и радиоэлектронной аппаратурой.

Для космического применения ЭКБ характеризуется многономенклатурными (до 4500 видов) малообъемными (до 100 единиц в год) показателями. Следует отметить, что надежность и качество ракетно-космической техники РФ достигается жестким соблюдением, прежде всего требованиями к ЭКБ. ЭКБ играет определяющую роль для достижения максимальной эффективности, надежности долговечности космических летательных аппаратов и космических систем.

При этом для обеспечения высоконадежной электронной компонентной базы необходимо выполнять следующее условие – обеспечивать стойкости к полям ионизирующего излучения космоса, широкому диапазону температур и механических напряжений. Для этого необходимо создавать ЭКБ специального применения, стойкие к данным внешним воздействующим факторам. Это накладывает ограничения на ЭКБ следующего плана: радиационно стойкие микропроцессоры дос-

тигли уровня 286/386-процессоров, тогда как в коммерческих изделиях от них уже практически отказались (используются процессоры уровня «Пентиум» и выше); радиационно стойкие оперативно запоминающие устройства имеют более чем на порядок меньшую информационную емкость; радиационно стойкие микросхемы имеют на 1–2 порядка большую стоимость; практически полное отсутствие для радиационно стойких микросхем на рынке прикладного программного обеспечения, особенно в России.

Оценка эффективности применения микросхем может быть представлена как интегральный показатель: от стоимости, времени разработки и поставки и функциональных возможностей. Рассматривая три класса изделий коммерческого (или промышленного), военного и космического назначения, эффективность применения микросхем космического назначения среди всех трех классов самая низкая.

Список литературы

1. Зольников, К. В. Расчет изменения схемотехнических параметров при воздействии низкоинтенсивного излучения факторов космического пространства [Текст] / К. В. Зольников, В. А. Скляр, В. П. Крюков, А. С. Грошев, К. А. Чубур // Моделирование систем и процессов. – 2015, № 3. – С. 27 – 31.
2. Алгоритмическая основа моделирования отказов на глубоко-субмикронных технологиях [Текст] / К. В. Зольников, А. И. Яньков, А. В. Ачкасов, К. А. Чубур // Моделирование систем и процессов. – 2015. – Т. 8, № 1. – С. 15 – 17.
3. Крюков, В. П. Основы проектирования генераторов комбинаторного беспорядка / В. П. Крюков, А. Ю. Кулай, А. Н. Зольникова // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 2. – С. 24 – 30.
4. Лавлинский, В. В. Теоретические основы формирования моделей и методов взаимодействия информационных процессов / В. В. Лавлинский, И. И. Струков // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 2. – С. 31 – 37.
5. Создание базиса для микросхем сбора и обработки данных / В. А. Скляр, А. В. Ачкасов, К. В. Зольников, И. И. Струков, К. А. Чубур // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 2. – С. 66 – 71.
6. Защита микропроцессоров от одиночных сбоев / В. А. Смерек, В. М. Антимиров, А. Ю. Кулай, А. Л. Савченко // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 2. – С. 71 – 77.
7. Уткин, Д. М. Оценка надежности программно-технических комплексов специального назначения / Д. М. Уткин, В. К. Зольников // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 2. – С. 78 – 84.

8. Информационные модели радиационных эффектов для оценки адекватности принятия решений / К. В. Зольников, В. М. Антимиров, А. Ю. Кулай, И. И. Струков, М. В. Солодилов, К. А. Чубур // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 15 – 20.

9. Зольников, К. В. Математическая модель оценки показателей надежности сложных программно-технических комплексов / К. В. Зольников, Д. М. Уткин, Ю. А. Чевычелов // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 21 – 26.

ELECTRONIC COMPONENT BASE FOR SPACE APPOINTMENTS

V. K. Zolnikov¹, A. Y. Kulai¹, V. P. Kryukov², S. A. Evdokimova¹,
T. V. Skvortsova¹, A. I. Yan'kov²

*¹Voronezh State Forestry Engineering University
named after G. F. Morozov, Voronezh*

²Research Institute of Electronic Technology, Voronezh

Abstract. The article discusses the current state of electronic industry. The basic perspective directions of scientific and practical developments.

Keywords: electronic device, electronic components, integrated circuit, electronic engineering, communication and management.

МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ СБОЕУСТОЙЧИВЫХ МИКРОСХЕМ

В. К. Зольников¹, А. Ю. Кулай¹, А. Л. Савченко¹, И. И. Струков¹,
К. А. Чубур¹, Ю. А. Чевычелов¹, А. И. Яньков²

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический
университет имени Г. Ф. Морозова», Воронеж

wkz@rambler.ru

²АО «Научно-исследовательский институт электронной техники»,
Воронеж

Аннотация. Рассмотрены разработка эффективных методов и средств для оценки сбоеустойчивости логических схем, задача выбора корректной метрики, оценивающая с заданной точностью эффективность того или иного метода на некотором классе логических схем, механизм логического маскирования, разработка маршрута ресинтеза комбинационных схем, методы повышения сбоеустойчивости.

Ключевые слова: сбоеустойчивость логических схем, механизм логического маскирования, методы оценки сбоеустойчивости, ресинтез участков схем, итерационное изменение схемы.

Пусть Ω будет обозначать набор всех вентилях в схеме, p – вероятность сбоя вентиля, N – число входов схемы, M – число элементов в схеме, \bar{X} и \bar{e} – входной вектор и вектор ошибки соответственно. Тогда надежность логической схемы характеризуется выражением, представляющим собой вероятность возникновения наблюдаемой ошибки на выходе схемы:

$$F(p) = \frac{1}{2^N} \sum_{\bar{X}, \bar{e}} E(\bar{X}, \bar{e}) p^{|\bar{e}|} (1-p)^{M-|\bar{e}|}, \quad (1)$$

где $E(\bar{X}, \bar{e})$ – характеристическая функция, принимающая значение единицы, если набор (\bar{X}, \bar{e}) приводит к ошибке, и ноль – в остальных случаях.

Из формулы (1) видно, что вычислительная сложность аналитического вычисления полинома ошибки экспоненциально зависит от числа входов и числа элементов, что делает этот метод неприменимым даже для сравнительно небольших схем. В настоящее время все методы оценки маскирующих свойств комбинационной логики балансируют между высокой вычислительной сложностью и точностью характеристик сбоеустойчивости.

Для оценки сбоеустойчивости логических схем предлагается использовать некоторый обобщенный коэффициент логической чувствительности схемы (2):

$$\alpha = \frac{1}{2^N} \sum_{\bar{X}, \bar{e}, |\bar{e}|=1} E(\bar{X}, \bar{e}), \quad (2)$$

где $|\bar{e}|=1$ говорит о том, что суммирование идет только по векторам ошибки с весом, равным единице.

Эта метрика сбоеустойчивости обладает рядом преимуществ по сравнению с предложенными ранее метриками. Во-первых, вычислительная сложность метода линейная относительно количества элементов, что вкпе с методами бит-параллельного моделирования и методами Монте-Карло позволяет использовать эту метрику для сравнительно больших схем. Во-вторых, предлагаемый коэффициент не зависит от вероятности сбоя вентиля, что позволяет использовать его на ранних этапах проектирования сбоеустойчивых схем, а также методов повышения сбоеустойчивости, когда не определена элементная база и условия эксплуатации схемы. В-третьих, для большинства практических применений, в условиях, когда вероятность сбоя вентиля стремится к нулю – эта аппроксимация является наиболее точной, являясь касательной к графику полинома ошибки в точке ноль.

Также для нахождения некоторой аппроксимации полинома ошибки, зависящего от вероятности сбоя вентиля был предложен метод, основанный на вычислении наблюдаемости, который опирается на расчет верхних и нижних границ для полинома ошибки.

$$F(p)_{\text{avg}} = \sum_{i \in \Omega} o_i p(1-p)^{N-1} + \frac{1}{2} (1 - (1-p)^N - Np(1-p)^{N-1}). \quad (3)$$

Эффективность данного подхода (Avg) в сравнении с традиционными методами (Obs) была оценена на большом наборе benchmark-схем.

Список литературы

1. Информационные модели радиационных эффектов для оценки адекватности принятия решений / К. В. Зольников, В. М. Антимиров, А. Ю. Кулай, И. И. Струков, М. В. Солодилов, К. А. Чубур // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 15 – 20.
2. Зольников, К. В. Математическая модель оценки показателей надежности сложных программно-технических комплексов / К. В. Зольников, Д. М. Уткин, Ю. А. Чевычелов // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 21 – 26.

3. Лавлинский, В. В. Синтез 3D моделей для проектирования МОП-транзисторов / В. В. Лавлинский, А. Л. Савченко // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 26 – 30.
4. Лавлинский, В. В. Математические зависимости формализации процедур проектирования МОП-транзисторов / В. В. Лавлинский, А. Л. Савченко, А. Ю. Кулай // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 31 – 38.
5. Арзамасцев, М. Ю. Анализ стойкости к ТЗЧ радиационно-стойкого микроконтроллера 1874BE10T, выполненного по отечественной технологии 0.25 мкм / М. Ю. Арзамасцев, А. И. Яньков // Моделирование систем и процессов. 2018. – Т. 11, № 1. – С. 4 – 9.
6. Характеризация и моделирование сигналов в САПР / В. А. Скляр, В. К. Зольников, А. И. Яньков, Ю. А. Чевычелов, В. Ф. Барабанов // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 62 – 67.
7. Архитектура нейропроцессоров для систем автоматического управления подвижными объектами / В. М. Антимиров, В. К. Зольников, В. В. Лавлинский, В. П. Крюков, А. Ю. Кулай, А. Л. Савченко // Моделирование систем и процессов. – 2017. – Т. 10, № 4. – С. 4 – 10.

**V. K. Zolnikov¹, A. Y. Kulai¹, A. L. Savchenko¹, I. I. Strukov¹,
K. A. Chubur¹, Y. A. Chevychelov¹, A. I. Yan'kov²**

*¹Voronezh State Forestry Engineering University
named after G. F. Morozov, Voronezh*

²Research Institute of Electronic Technology, Voronezh

METHODS TO CREATE FAULT-TOLERANT CIRCUITS

Abstract. This article discusses the development of effective methods and tools for assessing the failure tolerance of the logic circuits, the task of choosing the correct metric that evaluates with a given accuracy the effectiveness of a particular method for a certain class of logic circuits, the logical masking mechanism, development of the route resynthesize of combinational circuits, methods of increasing causticity.

Keywords: The tolerance of logical circuits, the logical masking mechanism, methods for evaluating failure tolerance, the resynthesis plots schemes, the iterative schema change.

ОЦЕНКА РЕСУРСА ИЗДЕЛИЙ ПО ИОНИЗАЦИОННЫМ И СТРУКТУРНЫМ ЭФФЕКТАМ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

**В. К. Зольников, А. Ю. Кулай, И. И. Струков, К. А. Чубур,
С. В. Гречаний, М. А. Солодилов, А. Л. Савченко**
*ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический
университет» имени Г. Ф. Морозова,
wkz@rambler.ru*

Аннотация. Предложены методы расчетно-экспериментальной оценки срока службы изделий с аддитивным и неаддитивным характером ионизационных и структурных эффектов в заданных радиационных условиях космического пространства.

Ключевые слова: деградационные кривые, ионизационные эффекты, эффекты структурных повреждений, нейтронное излучение, гамма-излучение, оптроны, компараторы.

В настоящее время основным методическим подходом к расчетно-экспериментальному моделированию деградации в условиях воздействия ионизирующего воздействия космического пространства (ИИ КП) для приборов с аддитивным характером ионизационных дозовых эффектов и эффектов структурных повреждений является использование моноэнергетических пучков электронов и протонов или замена электронного и протонного излучений КП на облучение гамма-квантами и нейтронами [1, 2].

Основу указанных выше методических подходов составляет допущение об аддитивном характере ионизационных и структурных эффектов, возникающих при воздействии ИИ КП. Это означает, что общее изменение информативного параметра может быть найдено как сумма изменений, определяющихся ионизационными дозовыми эффектами и эффектами структурных повреждений.

Предлагаемый метод содержит в себе два этапа. На первом этапе (экспериментальном):

1) формируются две выборки испытываемых изделий из одной технологической партии (рекомендуется, чтобы каждая выборка состояла из не менее чем пяти образцов). Первая выборка предназначена для облучения гамма-квантами, а вторая – для облучения реакторными нейтронами;

2) проводится пошаговое облучение гамма-квантами (рекомендуется ^{60}Co) образцов из первой выборки в активном электрическом режиме с измерением информативных параметров после каждого шага облучения. Облучение проводится до отказа испытываемого изделия. Для каждого полученного уровня ионизационной дозы определяется изменение информативного параметра для каждого образца, после чего эти изменения усредняются, и строится зависимость среднего изменения информативного параметра от ионизационной дозы $D_{\text{ион}}$;

3) проводится пошаговое облучение быстрыми нейтронами (рекомендуется использовать облучение с помощью исследовательских реакторов) образцов из второй выборки с измерением информативных параметров после каждого шага облучения. Облучение проводится до отказа испытываемого изделия. Облучение проводится в пассивном режиме (закороченные выводы у испытываемого прибора), если предварительно не показано, что при подаче электрического режима обеспечивается наилучший режим облучения. Для каждого полученного уровня дозы структурных повреждений определяется изменение информативного параметра для каждого образца, после чего эти изменения усредняются, и строится зависимость среднего изменения информативного параметра от $D_{\text{стр}}$.

Следует учесть, что пошаговое облучение нейтронами и измерение параметров после каждого шага может быть затруднено вследствие возникновения наведенной радиоактивности у облучаемых образцов и необходимостью ожидания спада активности до приемлемых уровней. Исходя из этого, можно разбить вторую выборку на несколько частей (порядка пяти частей), и каждую часть одновременно облучать своим флюенсом нейтронов. При этом размер второй выборки должен быть увеличен так, чтобы каждая часть состояла из не менее 2–3 образцов.

Расчетный этап:

1) для заданных радиационных условий применения испытываемых изделий на борту КА рассчитываются $D_{\text{ион}}$ и $D_{\text{стр}}$, приходящиеся на единицу времени работы в данных условиях;

2) выбирается шаг по шкале времени Δt , и для каждого момента времени t_i рассчитываются соответствующие значения ионизационной дозы и дозы структурных повреждений. При выборе шага по времени можно ориентироваться на значение дозы отказа, полученное при облучении нейтронами. Например, можно принять в качестве шага время, соответствующее набору $D_{\text{стр}}$, составляющей 1/10 от дозы отказа, полученной при облучении нейтронами;

3) для каждого момента времени t_i по измеренным деградационным кривым (шаги 2 и 3 экспериментального этапа) определяется изменение рассматриваемого информативного параметра за счет ионизационных эффектов и за счет эффектов структурных повреждений. Общее изменение информативного параметра для каждого момента времени определяется суммой изменений за счет ионизационных и структурных эффектов. В результате получается зависимость изменения информативного параметра от времени эксплуатации в заданных радиационных условиях КП.

Список литературы

1. MIL-STD-883J. Method 1019.9. Ionizing Radiation (Total Dose) Test Procedure. – 2013.
2. ESCC Basic Specification No. 22900. Total Dose Steady-State Irradiation Test Method. – 2010.
3. Анциферова, В. И. Интеграция средств автоматизации проектирования в обучающих системах радиоэлектроники / В. И. Анциферова, С. А. Евдокимова, Т. В. Скворцова // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 2. – С. 11 – 16.
4. Лавлинский, В. В. Теоретические основы формирования моделей и методов взаимодействия информационных процессов / В. В. Лавлинский, И. И. Струков // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 2. – С. 31 – 37.
5. Создание базиса для микросхем сбора и обработки данных / В. А. Скляр, А. В. Ачкасов, К. В. Зольников, И. И. Струков, К. А. Чубур // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 2. – С. 66 – 71.
6. Уткин, Д. М. Оценка надежности программно-технических комплексов специального назначения / Д. М. Уткин, В. К. Зольников // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 2. – С. 78 – 84.
7. Информационные модели радиационных эффектов для оценки адекватности принятия решений / К. В. Зольников, В. М. Антимиров, А. Ю. Кулай, И. И. Струков, М. В. Солодилов, К. А. Чубур // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 15 – 20.
8. Зольников, К. В. Математическая модель оценки показателей надежности сложных программно-технических комплексов / К. В. Зольников, Д. М. Уткин, Ю. А. Чевычелов // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 21 – 26.
9. Арзамасцев, М. Ю. Анализ стойкости к ТЗЧ радиационно-стойкого микроконтроллера 1874BE10T, выполненного по отечественной технологии 0.25 мкм / М. Ю. Арзамасцев, А. И. Яньков // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 4 – 9.

10. Характеризация и моделирование сигналов в САПР / В. А. Склад, В. К. Зольников, А. И. Яньков, Ю. А. Чевычелов, В. Ф. Барабанов // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 62 – 67.

11. Архитектура нейропроцессоров для систем автоматического управления подвижными объектами / В. М. Антимиров, В. К. Зольников, В. В. Лавлинский, В. П. Крюков, А. Ю. Кулай, А. Л. Савченко // Моделирование систем и процессов. – 2017. – Т. 10, № 4. – С. 4 – 10.

LIFE ASSESSMENT OF PRODUCTS BY IONIZATION AND STRUCTURAL EFFECTS FOR SPACE APPLICATIONS

**V. K. Zolnikov, A. Y. Kulai, I. I. Strukov, K. A. Chubur,
Y. A. Chevychelov, S. V. Grechanii, M. A. Solodilov, A. L. Savchenko**
*Voronezh State Forestry Engineering University
named after G. F. Morozov, Voronezh*

Abstract. In the article the methods of calculation and experimental assessment of service life of articles from additive and non-additive nature of the ionization and structural effects in the predetermined radiation conditions of outer space.

Keywords: degradation curves, ionization effects, displacement damage effects, neutron irradiation, gamma-irradiation, optocouplers, comparators.

СОЗДАНИЕ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ В ПРОЦЕССЕ ИСПЫТАНИЙ

**В. К. Зольников, А. Ю. Кулай, И. И. Струков, К. А. Чубур,
Ю. А. Чевычелов, С. В. Гречаный**

*¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический
университет имени Г. Ф. Морозова», Воронеж
wkz@rambler.ru*

Аннотация. Рассмотрен алгоритм программного обеспечения для проведения испытаний микроконтроллеров. Представлены технические средства контроля работоспособности ЭКБ специального назначения при экспериментальной оценке радиационной стойкости.

Ключевые слова: микроконтроллер, сверхбольшая интегральная схема (СБИС), алгоритм контроля сбоеустойчивости СБИС, ионизирующее излучение, оценка радиационной стойкости.

Архитектура микроконтроллеров идеально ориентирована для создания модификаций систем с реализацией функций управления и вычисления в реальном режиме времени под конкретные приложения. Этому способствуют высокая производительность микроконтроллеров, развитая система встроенных функциональных блоков, внутренняя программная память объемом и мощная система команд. Микросхемы могут служить элементной базой для систем управления различной аппаратурой.

При этих возможностях современных микроконтроллеров, характеризующихся большим числом функциональных режимов и радиационной неоднородностью СФ-блоков, стоит острая необходимость в проведении детального функционального контроля непосредственно в ходе испытаний и это необходимо учитывать при планировании испытаний.

Разработан алгоритм программного обеспечения для проведения испытаний микроконтроллеров. Разработанные технические средства контроля работоспособности ЭКБ специального назначения при экспериментальной оценке радиационной стойкости оснащены программным обеспечением, состоящим из управляющей программы на ПЭВМ и функциональных тестов записываемых в память микроконтроллеров [1 – 9].

Блок функционального контроля (БФК) реализовывает запись и считывание внутренней памяти испытываемой СБИС, при этом происходит контроль сохранности информации и функционирования. Контроль выходных сигналов (выходное напряжение высокого и низкого уровня) осуществляют с помощью запоминающего осциллографа типа

Tektronix, контроль тока потребления – с помощью миллиамперметра, включенного в цепь питания испытываемого микроконтроллера.

Разработанный алгоритм программы контроля сбоеустойчивости СБИС заключается в следующем: 1. После запуска программы происходит инициализация, т.е. контроллер ожидает появления байта на входе RX. 2. Затем происходит запись в ОЗУ микроконтроллера с 0034H по 01FFH адреса информации в виде последовательности тестов. Например, возможна запись последовательно чисел 0x55, 0x00, 0xAA, 0xFF. 3. После записи по указанным адресам числа 0x55 должно происходить считывание записанной информации из ОЗУ и проверка сохранности. Если будет зафиксировано изменение информации, то считается что произошел сбой. При этом проводится классификация сбоя (т.е. сбой ячейки памяти, сбой всего объема памяти или сбоя ядра СБИС и т.д.) и сохранение в файл информации о зафиксированном сбое. Затем программно выбирается команда аппаратного сброса и цикл начинается сначала. 4. Если после выполнения цикла считывания ОЗУ информация сохраняется (т.е. никакого сбоя не произошло), то происходит сохранение в рабочий файл информации о положительном выполнении цикла и продолжает выполняться вторая подпрограмма цикла (т.е. запись по указанным адресам следующего числа, например 0xAA). 5. Выполнение данного алгоритма будет осуществляться, пока не поступит команда о завершении испытаний. При этом на ПЭВМ сохраняется рабочий файл с информацией о количестве зафиксированных сбоев и времени их происхождения.

Результат проверки сохранности информации контролируется по выводу порта последовательной передачи данных. Полученная информация поступает на вход микросхемы MAX232A, которая содержит в себе интегральные преобразователи напряжения, позволяющие получить нужные для работы СОМ-порта ± 12 В и приводит поступающие сигналы к необходимому уровню для последующей передачи данной информации в ПК.

После окончания импульса сброса испытываемая микросхема начинает выполнение программы, записанной в ППЗУ. Считывание данных из внешнего ППЗУ осуществляется при низком уровне сигнала RD, а при высоком уровне сигнала RD-выходы микросхемы AT29C256 переводятся в третье состояние и отключаются от порта «адрес-данные».

Таким образом, разработанное алгоритмическое обеспечение для тестирования микроконтроллеров в условиях отсутствия тестового измерительного оборудования позволяет контролировать области наиболее поврежденные деградации при воздействии ионизирующего излучения и тяжелых заряженных частиц космического пространства.

Список литературы

1. Выбор значений параметров, определяющих кинетику накопления заряда в диэлектрике при радиационном воздействии [Текст] / В. К. Зольников, В. П. Крюков, В. Н. Ачкасов, В. А. Скляр // Моделирование систем и процессов. – 2015. – Т. 8, № 3. – С. 24 – 26.
2. Расчет изменения схемотехнических параметров при воздействии низкоинтенсивного излучения факторов космического пространства [Текст] / К. В. Зольников, В. А. Скляр, В. П. Крюков, А. С. Грошев, К. А. Чубур // Моделирование систем и процессов. – 2015. – Т. 8, № 3. – С. 27 – 31.
3. Анциферова, В.И. Интеграция средств автоматизации проектирования в обучающих системах радиоэлектроники / В. И. Анциферова, С. А. Евдокимова, Т. В. Скворцова // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 2. – С. 11 – 16.
4. Крюков, В. П. Основы проектирования генераторов комбинаторного беспорядка / В. П. Крюков, А. Ю. Кулай, А. Н. Зольникова // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 2. – С. 24 – 30.
5. Лавлинский, В. В. Теоретические основы формирования моделей и методов взаимодействия информационных процессов / В. В. Лавлинский, И. И. Струков // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 2. – С. 31 – 37.
6. Создание базиса для микросхем сбора и обработки данных / В. А. Скляр, А. В. Ачкасов, К. В. Зольников, И. И. Струков, К. А. Чубур // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 2. – С. 66 – 71.
7. Уткин, Д. М. Оценка надежности программно-технических комплексов специального назначения / Д. М. Уткин, В. К. Зольников // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 2. – С. 78 – 84.
8. Информационные модели радиационных эффектов для оценки адекватности принятия решений / К. В. Зольников, В. М. Антимириков, А. Ю. Кулай, И. И. Струков, М. В. Солодилов, К. А. Чубур // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 15 – 20.
9. Зольников, К. В. Математическая модель оценки показателей надежности сложных программно-технических комплексов / К. В. Зольников, Д. М. Уткин, Ю. А. Чевычелов // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 21 – 26.

CREATING TOOLS TO MONITORING THE HEALTH IN THE TESTING PROCESS

**V. K. Zolnikov, A. Y. Kulai, I. I. Strukov, K. A. Chubur,
Y. A. Chevychelov, S. V. Grechanii**

*¹Voronezh State Forestry Engineering University
named after G. F. Morozov, Voronezh*

Abstract. This article describes the software algorithm for testing microcontrollers. The technical means of control of the health network special purpose in experimental evaluation of radiation resistance.

Keywords: the microcontroller, verbally integrated circuits, the control algorithm of the failure tolerance of VLSI, ionizing radiation, evaluation of radiation resistance.

КОНСТРУКЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ МИКРОСХЕМ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В. К. Зольников¹, А. Ю. Кулай¹, И. И. Струков¹,
К. А. Чубур¹, Ю. А. Чевычелов¹, А. И. Яньков²

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический
университет имени Г. Ф. Морозова», Воронеж

²АО «Научно-исследовательский институт электронной техники»,
Воронеж
wkz@rambler.ru

Аннотация. Рассмотрены вопросы устойчивости КМОП БИС к ионизирующему облучению, предложены способы реализации.

Ключевые слова: система связи и управления, метод радиационно-термической отбраковки, повышение пороговых напряжений паразитных n -канальных транзисторов КМОП БИС, механизм Фаулера–Нордхейма, повышение устойчивости КМОП БИС.

Как показали проведенные исследования, наиболее эффективными по обеспечению радиационной стойкости радиоаппаратуры являются микросхемы на ТТЛШ- и КМОП-приборах. С переходом на высокую степень интеграции проявляются новые физические ограничения, которые снижают их радиационную стойкость. В результате проведенных работ были установлены механизмы отказов ТТЛШ БИС в условиях воздействия гамма-излучения – образование радиационно стимулированных каналов тока утечки между скрытыми n^+ – слоями отдельных компонентов БИС из-за наличия локальных дефектов (разрывов в слое охранного p^+ – кольца) и каналов тока утечки между коллектором и эмиттером отдельных транзисторов Шоттки из-за локальных смыканий эмиттерных областей транзистора с областью изолирующего диэлектрика. Предложен метод радиационно-термической отбраковки дефектных БИС с пониженной радиационной стойкостью. Выявлены оптимальные режимы обработки и восстановительного отжига, не ухудшающие надежность характеристики БИС. Применение метода радиационно-термической отбраковки наиболее эффективно для БИС, применяемых для построения особо ответственных ВиРТС космического назначения.

Для обеспечения устойчивости КМОП БИС к ионизирующему облучению предложены способы реализации блока изоляции, конструкции и технологии рабочих транзисторов, обеспечивающих высокую стабильность их характеристик.

Для повышения пороговых напряжений паразитных n -канальных транзисторов КМОП БИС предложено несколько способов формирования охранного кольца p -типа под слоем локального окисла, обеспечивающих широкий диапазон устойчивости БИС к различным дозам ионизирующего излучения. Предложен также новый способ формирования n -канального транзистора с формированием охранного кольца под тонким окислом с его легированием одновременно с истоками и стоками p -канальных транзисторов.

Предложена эффективная методика прогнозирования стойкости с использованием электрического метода, основанного на лавинной инжекции электронов в окисел, обеспечивающей снижение количества измерений без снижения их точности. В данном случае исследуемый подзатворный окисел подвергается воздействию положительных импульсов высокого напряжения, во время которого происходит туннелирование электронов из подложки в окисел по механизму Фаулера–Нордхейма. Некоторая часть инжектированных электронов посредством ударной ионизации приводит к образованию электронно-дырочных пар в объеме окисла. Получившиеся в результате этого процесса электроны и дырки ведут себя также, как и при их образовании при воздействии ионизирующего излучения на КМОП-структуру при положительном смещении на затворе. Приравнивая плотности положительного заряда в окисле при облучении и вследствие туннельного эффекта, можно получить аналитическую зависимость дозы облучения и суммарную плотность инжектированного в окисел заряда. Предложенная методика в силу своих преимуществ (простоты и оперативности) позволила провести большой объем экспериментальных работ, в результате которых определены оптимальные технологические режимы формирования радиационно стойких КМОП-структур. При их отработке также исследованы зависимость сдвига напряжения плоских зон от режимов формирования окисла, его толщины, режимов отжига и последующих технологических операций. В процессе исследования определен оптимальный технологический маршрут получения КМОП-структур, устойчивых к ионизирующему воздействию [2, 3].

Предложен способ повышения устойчивости КМОП БИС к воздействию тяжелых заряженных частиц космического пространства большой мощности. Для этого необходимо было увеличить напряжение удержания паразитного тиристора за счет значительного уменьшения коэффициента усиления горизонтальных паразитных биполярных транзисторов.

Для отработки технологического маршрута изготовления радиационно стойких КМОП БИС определен набор различных групп типовых тестовых элементов и изготовлены соответствующие пластины, проведены лазерные и рентгеновские имитационные испытания, которые позволили провести обобщенную оценку их работоспособности.

Проведенные исследования положены в основу разработки практически всех типов БИС, обладающих необходимым уровнем радиационной стойкости.

Список литературы

1. Выбор значений параметров, определяющих кинетику накопления заряда в диэлектрике при радиационном воздействии [Текст] / В. К. Зольников, В. П. Крюков, В. Н. Ачкасов, В. А. Скляр // Моделирование систем и процессов. – 2015. – Т. 8, № 3. – С. 24 – 26.
2. Расчет изменения схмотехнических параметров при воздействии низкоинтенсивного излучения факторов космического пространства [Текст] / К. В. Зольников, В. А. Скляр, В. П. Крюков, А. С. Грошев, К. А. Чубур // Моделирование систем и процессов. – 2015. – Т. 8, № 3. – С. 27 – 31.
3. Защита микропроцессоров от одиночных сбоев / В. А. Смерек, В. М. Антимиров, А. Ю. Кулай, А. Л. Савченко // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 2. – С. 71 – 77.
4. Информационные модели радиационных эффектов для оценки адекватности принятия решений / К. В. Зольников, В. М. Антимиров, А. Ю. Кулай, И. И. Струков, М. В. Солодилов, К. А. Чубур // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 15 – 20.
5. Зольников, К. В. Математическая модель оценки показателей надежности сложных программно-технических комплексов / К. В. Зольников, Д. М. Уткин, Ю. А. Чевычелов // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 21 – 26.
6. Характеризация и моделирование сигналов в САПР / В. А. Скляр, В. К. Зольников, А. И. Яньков, Ю. А. Чевычелов, В. Ф. Барабанов // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 62 – 67.
7. Архитектура нейропроцессоров для систем автоматического управления подвижными объектами / В. М. Антимиров, В. К. Зольников, В. В. Лавлинский, В. П. Крюков, А. Ю. Кулай, А. Л. Савченко // Моделирование систем и процессов. – 2017. – Т. 10, № 4. – С. 4 – 10.

DESIGN AND TECHNOLOGY OF MICROCIRCUITS FOR SPACE APPLICATIONS

V. K. Zolnikov¹, A. Y. Kulai¹, I. I. Strukov¹, K. A. Chubur¹,
Y. A. Chevychelov¹, A. I. Yan'kov²

¹*Voronezh State Forestry Engineering University
named after G. F. Morozov, Voronezh*

²*Research Institute of Electronic Technology, Voronezh*

Abstract. This article discusses the development of adaptive system of stabilization and control for military and civil purposes to provide the desired reliability.

Keywords: communication system and control method for radiation heat rejection, increasing the threshold voltages of the parasitic p-channel transistors of the integrated circuits, the mechanism of Fowler–Nordheim, resistance of the integrated circuits.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ МИКРОСХЕМ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

**К. В. Зольников, А. И. Яньков, В. П. Крюков,
М. Ю. Арзамасцев, И. П. Потапов, В. А. Скляр,
В. А. Смерек, Ф. В. Макаренко**

*АО «Научно-исследовательский институт электронной техники»,
Воронеж
wkz@rambler.ru*

Аннотация. Рассмотрен расчет эффектов одиночных событий в образцах ЭРИ аналогово-цифрового преобразователя в различных режимах. Представлены данные, возникшие в процессе облучения одиночных радиационных эффектов.

Ключевые слова: тиристорный эффект, события сбоев переключения, события одиночных функциональных сбоев.

Введение. Объектом испытаний являлись образцы микросхем АЦП с элементами оперативной памяти, функциональное назначение – СБИС типа «система на кристалле» 2...4-канального приемного тракта со встроенным 18-разрядным АЦП и программируемым АЛУ ЦОС. Исследования факторов статического излучения для этих микросхем уже были проведены в работах [1, 2].

Целью испытаний было определение основных информативных зависимостей параметров-критериев годности от значений характеристик спецфакторов, исследование зависимости уровней сбоеустойчивости изделий к воздействию спецфакторов от режимов (электрических, функциональных) и условий работы при воздействии ионов с ЛПЭ.

Задачи испытаний – получение экспериментальных данных для расчета сечений эффектов одиночных событий в образцах ЭРИ 5534ТХ014 в различных режимах.

В процессе облучения контролировали возникновение следующих одиночных радиационных эффектов (ОРЭ):

- отказ необратимого (катастрофического) типа (КО);
- тиристорный эффект (SEL);
- события инвертирования отдельных ячеек памяти (SEU);
- события сбоев переключения (SET);
- события одиночных функциональных сбоев (SEFI).

Для проведения облучений образцы аналогово-цифрового преобразователя размещали на плате адаптере, которую устанавливали в вакуумной камере стенда. Плата адаптер обеспечивала коммутацию выводов аналогово-цифрового преобразователя с контрольно-измерительным оборудованием и управление режимами работы.

Во время облучения выполняли функциональный контроль образца аналогово-цифрового преобразователя с регистрацией событий одиночных эффектов того или иного типа и контроль токов потребления.

В процессе облучений образцов измерение интегрального потока (флюенса) ионов проводили с помощью трековых детекторов в соответствии с «Методикой измерений флюенса тяжелых заряженных частиц с помощью трековых мембран на основе лавсановой пленки» (свидетельство об аттестации МИ № 22/2015-11 от 02.10.2015 г.), а также пятью пропорциональными счетчиками. Данные, полученные с пропорциональных счетчиков, были использованы только для относительной оперативной оценки текущих значений потока и плотности потока частиц непосредственно в процессе облучения.

Энергия ионов была измерена времяпролетным методом в соответствии с «Методикой измерений кинетической энергии тяжелых заряженных частиц по времени пролета».

Для проведения облучений образцов была разработана и изготовлена технологическая оснастка, реализующая режимы функционирования испытываемого аналогово-цифрового преобразователя и обеспечивающая измерение параметров-критериев годности.

Для проведения испытаний образцов аналогово-цифрового преобразователя использовали рабочее место на основе магистрально-модульных приборов, работающих в интерфейсе PXI.

Управление контрольно-измерительным оборудованием для контроля параметров, результатов ФК-образцов, одиночных радиационных эффектов и катастрофического отказа выполняли с помощью специального программного обеспечения.

Использованные средства измерения были утвержденного типа и поверены в соответствии с «Порядком проведения поверки средств измерений, требованиями к знаку поверки и содержанию свидетельства о поверке».

Испытательное оборудование было аттестовано в соответствии с ГОСТом.

Для проведения облучений были удалены крышки корпусов образцов ЭРИ над полупроводниковым кристаллом (декапсуляция).

Было декапсулировано три образца аналогово-цифрового преобразователя.

Выборка для испытаний сформирована из трех декапсулированных работоспособных образцов аналогово-цифрового преобразователя с номерами 1 – 3.

При испытаниях ЭРИ было проведено 24 сеанса облучений.

При облучениях образцов ЭРИ ионами возникновение тиристорного эффекта (SEL), катастрофического отказа и эффектов функционального прерывания не зарегистрировано.

Список литературы

1. Выбор значений параметров, определяющих кинетику накопления заряда в диэлектрике при радиационном воздействии [Текст] / В. К. Зольников, В. П. Крюков, В. Н. Ачкасов, В. А. Скляр // Моделирование систем и процессов. – 2015. – Т. 8, № 3. – С. 24 – 26.
2. Расчет изменения схемотехнических параметров при воздействии низкоинтенсивного излучения факторов космического пространства [Текст] / К. В. Зольников, В. А. Скляр, В. П. Крюков, А. С. Грошев, К. А. Чубур // Моделирование систем и процессов. – 2015. – Т. 8, № 3. – С. 27 – 31.
3. Информационные модели радиационных эффектов для оценки адекватности принятия решений / К. В. Зольников, В. М. Антимиров, А. Ю. Кулай, И. И. Струков, М. В. Солодилов, К. А. Чубур // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 15 – 20.
4. Зольников, К. В. Математическая модель оценки показателей надежности сложных программно-технических комплексов / К. В. Зольников, Д. М. Уткин, Ю. А. Чевычелов // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 21 – 26.
5. Лавлинский, В. В. Синтез 3D моделей для проектирования МОП-транзисторов / В. В. Лавлинский, А. Л. Савченко // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 26 – 30.
6. Лавлинский, В. В. Математические зависимости формализации процедур проектирования МОП-транзисторов / В. В. Лавлинский, А. Л. Савченко, А. Ю. Кулай // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 31 – 38.
7. Арзамасцев М. Ю. Анализ стойкости к ТЗЧ радиационно-стойкого микроконтроллера 1874BE10T, выполненного по отечественной технологии 0.25 мкм / М. Ю. Арзамасцев, А. И. Яньков // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 4 – 9.

8. Характеризация и моделирование сигналов в САПР / В. А. Скляр, В. К. Зольников, А. И. Яньков, Ю. А. Чевычелов, В. Ф. Барабанов // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 62 – 67.

9. Архитектура нейропроцессоров для систем автоматического управления подвижными объектами / В. М. Антимиров, В. К. Зольников, В. В. Лавлинский, В. П. Крюков, А. Ю. Кулай, А. Л. Савченко // Моделирование систем и процессов. – 2017. – Т. 10, № 4. – С. 4 – 10.

THE STUDY OF STABILITY OF ICS ON THE INFLUENCE OF HEAVY CHARGED PARTICLES

**K. V. Zolnikov, A. I. Yankov, V. P. Kryukov,
M. Yu. Arzamastsev, I. P. Potapov, V. A. Sklyar,
V. A. Smerek, V. F. Makarenko,**

Research Institute of Electronic Technology, Voronezh

Abstract. The article deals with the calculation of single event effects in samples ERIE analog-to-digital Converter in various modes. The data presented during the irradiation a single radiation effects.

Keywords: thyristor effect, failure events switching events of a single functional failures.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОКА ИОНИЗАЦИИ ДЛЯ МИКРОСХЕМ В КОСМИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

А. Н. Зольникова¹, В. П. Крюков², А. Ю. Кулай¹, К. А. Чубур¹,
И. И. Струков¹, А. Л. Савченко¹, С. В. Гречаный¹

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический
университет имени Г. Ф. Морозова», Воронеж

²АО «Научно-исследовательский институт электронной техники»,
Воронеж
wcz@rambler.ru

Аннотация. Рассмотрен схемотехнический и конструктивно-технологический базис новых разработок микросхем специального назначения, определены перспективы его развития.

Ключевые слова: микросхема, электронная компонентная база, вычислительные системы, радиотехнические системы, электронная промышленность.

Моделирование воздействия ТЗЧ на схемотехническом уровне заключается во внесении в эквивалентную схему замещения дополнительных генераторов тока, емкостей, паразитных биполярных транзисторов и резисторов, которые с некоторой частотой включаются в работу [1 – 3].

Для этого к стандартной модели транзистора КМОП добавляется генератор тока ионизации (I_{pp}), сопротивление подложки между контактом к ней и стоковым p - n -переходом (R) и паразитный транзистор (VT) [4].

Генератор тока описывается стандартной функцией, имеющейся в пакете Cadence на основе экспоненциальной функции, так как она практически точно повторяет ток ионизации [5 – 7]. Импульс тока экспоненциальной формы условно разбит на три участка, которые соответствуют току ионизации в состоянии «до», «в процессе воздействия ТЗЧ» и «после воздействия ТЗЧ».

На основе этого создаются новые библиотечные элементы, которые дополнены указанными выше элементами. Такие элементы получили название «радиационные». Ток генератора – ток ионизации в МОП-транзисторе вносится в p - n -переход «сток–подложка». В результате наблюдается увеличение тока стока в течение некоторо-

го малого времени, уменьшение порогового напряжения МОП-транзистора, что в конечном итоге приводит к переключению логического состояния.

При попадании ТЗЧ на элемент схемы включается генератор тока ионизации и паразитный транзистор, который приключает схему на время действия эффекта ($t_{эф}$).

Математически работа МОП-транзистора в статическом режиме соответствует нулевому току затвора $I_g = 0$ и подложки I_b . Предложено ввести ток ионизации, тогда выражения для вычисления токов стока и истока описываются формулами:

$$I_d = I_{ds} [\exp(V_{bd} / (NV_t)) - 1] - I_{drain};$$

$$I_s = I_{ss} [\exp(V_{bs} / (NV_t)) - 1] + I_{ион} + I_{drain}.$$

Задача схемотехнического моделирования – определить все временные характеристики и эти результаты будут основой моделирования на функционально-логическом уровне.

Основываясь на вышеназванных рассуждениях, должны быть получены все временные схемы для всех библиотечных элементов.

Основная трудность состоит в том, что частица может попасть в элемент в любой момент времени и ее энергия будет иметь различное значение.

Поэтому используется следующее допущение – частица попадает в схему в момент времени, равный началу переключения. Частота работы микросхемы составляет 30 МГц, что соответствует большинству частот, которые требует заказчик аппаратуры, используемой в космических летательных аппаратах. Тогда длительность одного такта составляет 0,3 мкс. Время действия переключательных процессов радиационного переключения составляет от долей микросекунд до 2 мс, поэтому, как правило, элемент не возвращается в свое исправное состояние, даже если некоторое состояние длится несколько тактов.

Характеризация по энергии частиц достигается выбором коэффициентов аппроксимации для соответствующих энергий.

Таким образом, получаются все библиотечные элементы, начиная от самого простого до сложного, которые соответствуют поведению элементов на схемотехническом уровне при воздействии ТЗЧ.

Список литературы

1. Анциферова, В. И. Анализ подготовки специалистов по радиоэлектронике для научно-производственных и коммерческих структур в современных условиях [Текст] / В. И. Анциферова, В. К. Зольников // Моделирование систем и процессов. – 2009. – № 3-4. – С. 5 – 12.
2. Машевич, П. Р. Инструментальные средства автоматизации проектирования изделий микроэлектроники дизайн-центра [Текст] / П. Р. Машевич, В. К. Зольников, К. И. Таперо. – Воронеж: ВГУ, 2006. – 179 с.
3. Анциферова, В. И. Интеграция средств автоматизации проектирования в обучающих системах радиоэлектроники / В. И. Анциферова, С. А. Евдокимова, Т. В. Скворцова // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 2. – С. 11 – 16.
4. Крюков, В. П. Основы проектирования генераторов комбинаторного беспорядка / В. П. Крюков, А. Ю. Кулай, А. Н. Зольникова // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 2. – С. 24 – 30.
5. Создание базиса для микросхем сбора и обработки данных / В. А. Скляр, А. В. Ачкасов, К. В. Зольников, И. И. Струков, К. А. Чубур // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 2. – С. 66 – 71.
6. Уткин, Д. М. Оценка надежности программно-технических комплексов специального назначения / Д. М. Уткин, В. К. Зольников // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 2. – С. 78 – 84.
7. Информационные модели радиационных эффектов для оценки адекватности принятия решений / К. В. Зольников, В. М. Антимиров, А. Ю. Кулай, И. И. Струков, М. В. Солодилов, К. А. Чубур // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 15 – 20.
8. Зольников, К. В. Математическая модель оценки показателей надежности сложных программно-технических комплексов / К. В. Зольников, Д. М. Уткин, Ю. А. Чевычелов // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 21 – 26.
9. Лавлинский, В. В. Синтез 3D моделей для проектирования МОП-транзисторов / В. В. Лавлинский, А. Л. Савченко // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 26 – 30.
10. Математические зависимости формализации процедур проектирования МОП-транзисторов / В. В. Лавлинский, А. Л. Савченко, А. Ю. Кулай // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 31 – 38.
11. Арзамасцев, М. Ю. Анализ стойкости к ТЗЧ радиационно-стойкого микроконтроллера 1874BE10T, выполненного по отечественной технологии 0.25 мкм / М. Ю. Арзамасцев, А. И. Яньков // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 4 – 9.
12. Характеризация и моделирование сигналов в САПР / В. А. Скляр, В. К. Зольников, А. И. Яньков, Ю. А. Чевычелов, В. Ф. Барабанов // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 62 – 67.

13. Архитектура нейропроцессоров для систем автоматического управления подвижными объектами / В. М. Антимиров, В. К. Зольников, В. В. Лавлинский, В. П. Крюков, А. Ю. Кулай, А. Л. Савченко // Моделирование систем и процессов. – 2017. – Т. 10, № 4. – С. 4 – 10.

SIMULATION OF IONIZATION CURRENT FOR CIRCUITS IN THE SPACE ENVIRONMENT

**A. N. Zolnikova¹, V. P. Kryukov², A. Y. Kulai¹, K. A. Chubur¹,
I. I. Strukov¹, A. L. Savchenko¹, S. V. Grechanii¹**

*¹Voronezh State Forestry Engineering University
named after G. F. Morozov, Voronezh*

²Research Institute of Electronic Technology, Voronezh

Abstract. In the paper, circuit and technological basis of new developments of special purpose chips, determined the prospects of its development.

Keywords: microcircuit, electronic component base, computer systems, radio engineering systems, electronic industry.

ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ИК-СИГНАТУР ОБЪЕКТОВ СПЕЦИАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА

И. Н. Ищук¹, Ю. Ю. Громов², А. В. Парфирьев³

¹*Сибирский федеральный университет, Красноярск*

²*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный
технический университет», Тамбов*

³*Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и
Ю. А. Гагарина», Воронеж*

Аннотация. Рассмотрено численное решение дифференциального уравнения теплопроводности с целью дальнейшего его применения в задачах повышения эффективности обнаружения объектов специального мониторинга.

Ключевые слова: обнаружение объектов, нелинейная зависимость теплопроводности, гидрометеорологические условия.

Известные методы обнаружения объектов специального мониторинга (СМ) с применением тепловизионной аппаратуры среднего и дальнего ИК-диапазона электромагнитного спектра не в полной мере обеспечивают требуемую эффективность, особенно в случае применения противником средств маскировки. К числу таких основных общих способов пассивной маскировки от оптико-электронных средств разведки относятся: экранирование объектов; уменьшение разности излучения объекта и фона; изменение параметров излучения и формы объекта; изменение состава и взаимного расположения объектов. Тем временем принятие решения об обнаружении осуществляется путем анализа инфракрасных сигнатур объектов СМ и подстилающей поверхности, которые с течением времени в ходе установившегося теплообмена выравниваются, что существенно уменьшает вероятность правильного обнаружения [1].

Кроме того, известны методы обнаружения, основанные на активном неразрушающем тепловом контроле с учетом их теплофизических параметров (теплопроводность и температуропроводность) [2].

Однако в указанных методах не учитываются гидрометеорологические условия, которые оказывают непосредственное влияние на эффективность обнаружения. Данный факт обуславливает необходимость совершенствования существующих и разработки новых методов обнаружения объектов СМ с учетом влияния параметров окружающей среды.

Целью работы является повышения эффективности исследования процессов формирования сигнатур объектов СМ в ИК-диапазоне длин

волн на основе численного решения задачи теплопроводности, позволяющего учесть гидрометеорологические условия, на примере рассмотрения задачи распределения тепла в стержне единичной длины.

Задача о распределении тепла в стержне единичной длины имеет вид [3, 4]:

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = a(T) \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где $a(T) = \frac{\lambda(T)}{c\rho}$ – температуропроводность стержня; $\lambda(T)$ – теплопроводность стержня, нелинейно зависящая от его температуры; c – удельная теплоемкость стержня; ρ – плотность стержня; $T(x, t)$ – функция распределения температуры в стержне; x – пространственная координата; t – время.

Граничные условия для этой задачи заключаются в задании значений температуры на концах стержня:

$$T(0,t) = -\lambda(T) \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \Big|_{x=0} - \alpha(T_{\text{п}} - T_A) - \varepsilon \sigma (T_{\text{п}}^4 - T_A^4), \quad T(1,t) = 0, \quad (2)$$

где T – избыточная температура; $T_{\text{п}}$ – абсолютная температура поверхности стержня; T_A – температура окружающей среды; α – коэффициент теплоотдачи; ε – коэффициент излучения; σ – постоянная Стефана-Больцмана.

Начальные условия задают профиль температуры по всей длине стержня в начальный момент времени:

$$T(x, 0) = 0. \quad (3)$$

Для численного решения уравнения (1) с учетом граничных (2) и начальных (3) условий с использованием неявных схем [1, 5] вводится система уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} T_0^k &= \frac{T_1^{k+1} \lambda(T_0^k) (\Delta x_1^2 + 2a(T_0^k)) + 2Ea(T_0^k) \Delta x_1 \Delta r}{\lambda(T_0^k) \Delta x^2} - \frac{2T_0^{k+1} a(T_0^k) \Delta r (\lambda + \alpha)}{\lambda(T_0^k) \Delta x^2}, \\ T_1^k &= \frac{2a(T_1^k) \Delta r}{(\Delta x_1 + \Delta x) \Delta x_1} T_0^{k+1} - \left(\frac{2a(T_1^k) \Delta r}{\Delta x_1 \Delta x} + 1 \right) T_0^{k+1} + \frac{2a(T_1^k) \Delta r}{(\Delta x_1 + \Delta x) \Delta x} T_2^{k+1}; \\ T_2^k &= \frac{a(T_2^k) \Delta r}{\Delta x^2} T_1^{k+1} - \left(\frac{2a(T_2^k) \Delta r}{\Delta x^2} + 1 \right) T_2^{k+1} + \frac{a(T_2^k) \Delta r}{\Delta x^2} T_3^{k+1}; \\ T_{M-1}^k &= \frac{a(T_{M-1}^k) \Delta r}{\Delta x^2} T_{M-2}^{k+1} - \left(\frac{2a(T_{M-1}^k) \Delta r}{\Delta x^2} + 1 \right) T_{M-1}^{k+1} + \frac{a(T_{M-1}^k) \Delta r}{\Delta x^2} T_M^{k+1}, \end{aligned} \right. \quad (4)$$

где T_m^k – температура стержня; m, k – номера отсчетов по пространству и по времени; $m \in \overline{1, M}$, $k \in \overline{1, K}$, Δr , Δx , Δt – шаги дискретизации по времени и по пространству (используется неравномерная разностная сетка), E – энергетическая светимость источника ИК-излучения.

Нелинейность смешанной начально-краевой задачи (1) – (3) заключается в зависимости теплопроводности стержня от его температуры. Однако математические методы расчета теплопроводности твердого материала отсутствуют, его величина и зависимость от температуры определяются экспериментально.

Для численного решения система (4) представляется в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} b_1 & c_1 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ a_1 & b_2 & c_2 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & a_2 & b_3 & c_3 & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & c_{n-1} & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & a_{n-1} & b_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ d_n \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где a_j , b_j , c_j – соответствующие множители в сеточном уравнении, и преобразуется в эквивалентную ей систему:

$$\begin{bmatrix} 1 & c_1^* & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & c_2^* & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & c_3^* & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & c_{n-1}^* & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1^* \\ d_2^* \\ d_3^* \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ d_n^* \end{bmatrix},$$

где

$$c_1^* = c_1 / b_1, \quad c_{j+1}^* = \frac{c_j + 1}{b_{j+1} - a_j c_j^*}, \quad j = 1, 2, \dots, n-2;$$

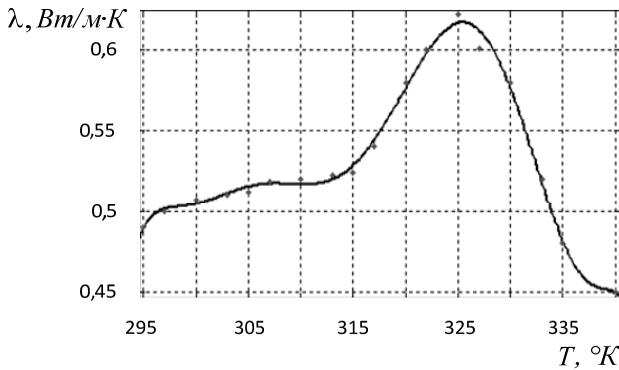
$$d_1^* = d_1 / b_1, \quad d_{j+1}^* = \frac{d_{j+1} - a_j d_j^*}{b_{j+1} - a_j c_j^*}, \quad j = 1, 2, \dots, n-1;$$

Матрица новой системы устроена так, что эта система решается путем последовательного вычисления снизу вверх следующих выражений:

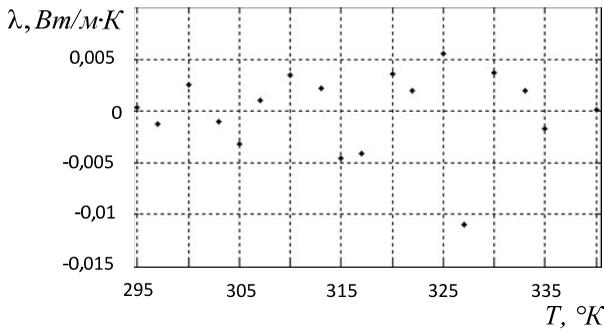
$$x_n = d_n, x_j = d_j^* - c_j^* x_{j+1}, \quad j = n-1, n-2, \dots, 2, 1. \quad (6)$$

Для учета нелинейных эффектов, связанных с зависимостью теплофизических параметров от температуры в ходе построения численного решения смешанной начально-краевой задачи теплопроводности (1 – 3) был применен интерполяционный полином Лагранжа.

Построенное численное решение было применено для обработки данных натурного эксперимента для однородной гомогенной дисперсной среды (кварцевый песок). На рисунке 1 приведен график зависимости тепло-



а)



б)

Рис. 1. График зависимости теплопроводности кварцевого песка от температуры:

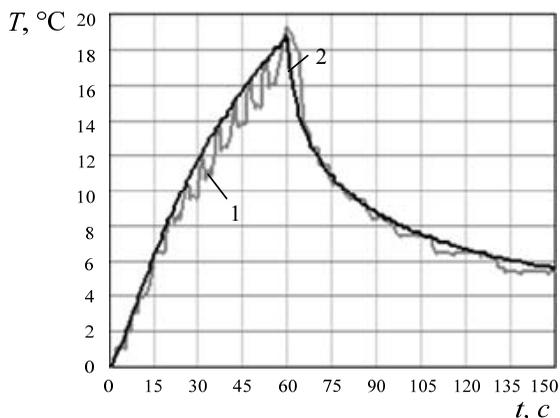
а – экспериментальный график зависимости теплопроводности от температуры и график функции полинома Лагранжа; б – график невязок в точках контроля

проводности кварцевого песка от его температуры, полученный экспериментальным путем, который был аппроксимирован полиномом 8-й степени

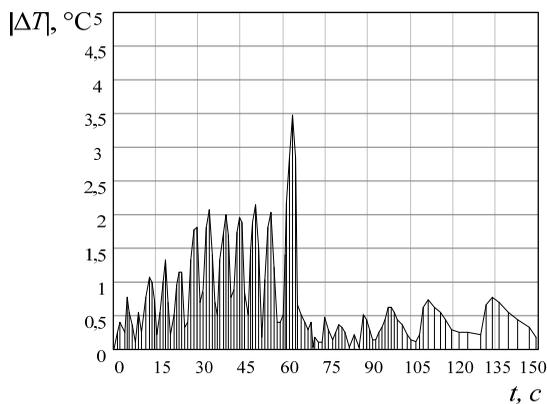
$$f(x) = p_1x^8 + p_2x^7 + p_3x^6 + p_4x^5 + p_5x^4 + p_6x^3 + p_7x^2 + p_8x + p_9, \quad (7)$$

где $f(x)$ – интерполян; $p_1 = -1,23 \cdot 10^{-11}$; $p_2 = 3,12 \cdot 10^{-8}$; $p_3 = -3,46 \cdot 10^{-5}$; $p_4 = 21,88 \cdot 10^{-3}$; $p_5 = -8,655$; $p_6 = 21,9 \cdot 10^2$; $p_7 = -3,46 \cdot 10^5$; $p_8 = 3,12 \cdot 10^7$; $p_9 = -1,23 \cdot 10^9$.

С учетом нелинейной зависимости теплопроводности кварцевого песка от его температуры на рис. 2, а приведены графики избыточных



а)



б)

Рис. 2. Графики избыточных температур и относительной погрешности:
а – графики избыточных температур, полученные экспериментальным путем и
 путем численного решения; *б* – график абсолютной погрешности

температур от времени в одной точке контроля в процессе нагрева и остывания однородной гомогенной дисперсной среды (кварцевый песок), полученные экспериментальным путем (линия 1) и путем численного решения (линия 2). На рисунке 2, б приведена абсолютная погрешность ΔT расчета избыточных температур.

Сравнение результатов указывает на то, что применение численного решения позволяет адекватно исследовать тепловые процессы в режиме реального времени.

Заключение. Таким образом, построенное численное решение задачи теплопроводности позволяет учесть нелинейную зависимость теплопроводности от температуры, а также влияние внешних факторов окружающей среды, тем самым повысить эффективность исследования процессов формирования сигнатур объектов СМ в ИК-диапазоне длин волн.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-08-00053 А).

Список литературы

1. Меньшаков, Ю. К. Основы защиты от технических разведок / Ю. К. Меньшаков. – М.: ИПЦ «Маска», 2017. – 572 с.
2. Карташов, Э. М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел / Э. М. Карташов. – М.: Высшая школа, 2001. – 500 с.
3. Фарлоу, С. Уравнения с частными производными для научных работников и инженеров / С. Фарлоу. – М.: Мир, 1985. – 384 с.
4. Обработка изображений в инфракрасном диапазоне волн на основе идентификации тепловых свойств скрытых подповерхностных объектов / И. Н. Ищук, Ю. Ю. Громов, Т. Г. Самхарадзе, А. И. Фесенко // Инженерная физика. – 2009. – № 2. – С. 3 – 11.
5. Модель анализа динамики векторного метеорологического процесса / М. Г. Матвеев, В. В. Михайлов, М. Е. Семенов, Е. А. Сирота // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2013. – № 1. – С. 89 – 94.

**APPLICATION OF NUMERICAL METHODS IN THE DECISION
OF PROBLEMS OF HEAT CONDUCTIVITY AT RESEARCH OF
IR-SIGNATURES OF OBJECTS OF SPECIAL MONITORING**

I. N. Ischuk¹, Yu. Yu. Gromov², A. V. Parfiriev³

¹Siberian federal university, Krasnoyarsk

²Tambov State Technical University, Tambov

³Military Educational and Scientific Center of the Air Force

N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy, Voronezh

Abstract. The numerical solution of differential equations of heat conduction in order to further its application to problems of improving the efficiency of detection of objects of a special monitoring.

Keywords: detection of objects, nonlinear dependence of the thermal conductivity, hydrometeorological conditions.

ПОИСК ОБЪЕКТОВ НА ТЕПЛОВЫХ ТОМОГРАММАХ ПО ИХ ГИСТОГРАММАМ

И. Н. Ищук¹, Д. Д. Дмитриев¹, А. М. Филимонов²

¹*Сибирский федеральный университет, Красноярск
boerby@rambler.ru*

²*Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского
и Ю. А. Гагарина», Воронеж*

Аннотация. Описаны основные этапы построения тепловых томограмм по данным дистанционного мониторинга земной поверхности. Так же приведен результат обработки тепловой томограммы с использованием программного и алгоритмического обеспечения, реализующего гистограммный метод поиска объектов на изображении по шаблонам.

Ключевые слова: инфракрасное изображение, тепловая томограмма, обнаружение объектов, гистограммные методы, обработки изображений.

Одной из новейших и наиболее перспективных технологий поиска стационарных и квазистационарных малозаметных (маскированных) техногенных объектов является технология поиска таких объектов по тепловым томограммам. Под тепловой томограммой понимается изображение, полученное в результате преобразования последовательности инфракрасных изображений, каждый пиксел которого соответствует значению теплофизического параметра (в частности, теплопроводности), рассчитанной исходя из динамики изменений температур в этом пикселе в течение времени. Преобразование температур в теплопроводности осуществляется специальным программным обеспечением, в котором реализован математический аппарат, основанный на методах теплофизики и оптимизации. Каждый пиксел изображения тепловой томограммы строится путем минимизации функционала невязки между измеренными тепловизионным приемником значениями температур на участке местности и рассчитанными математически. В процессе оптимизации для каждого пиксела томограммы определяются значения эффективной теплопроводности – основного теплофизического параметра, определяющего значение температуры на поверхности и внутри объектов аэрофотосъемки. Классифицировав рассчитанные значения теплопроводностей, возможно повысить вероятность обнаружения объектов, в которых динамика изменения температур отличается от динамики изменения температуры фона.

В основе математической модели для расчета температурных полей лежит дифференциальное уравнение теплопроводности [1]. Для учета метеорологических условий в момент фото- и видеосъемки в математической постановке вводят специальные граничные условия теплового баланса земной поверхности, учитывающие особенности процесса теплообмена в естественных условиях [2].

Для гистограммного анализа рассчитанных томограмм на предмет наличия на них объектов, шаблоны которых будут находиться в создаваемой базе данных эталонов-образцов, разработано и апробировано специальное алгоритмическое и программное обеспечение.

Выбор гистограммных методов распознавания объектов на изображении обосновывается устойчивостью их к поворотам и сдвигам (т.е. гистограмма не содержит характеристики о пространственном расположении пикселей), а также тем, что гистограммы тепловых томограмм легко поддаются разделению на сегменты, в зависимости от класса теплопроводностей.

Полученная отдешифрованная томограмма может быть интегрирована в существующие геоинформационные системы в качестве нового информационного слоя, что позволит повысить эффективность

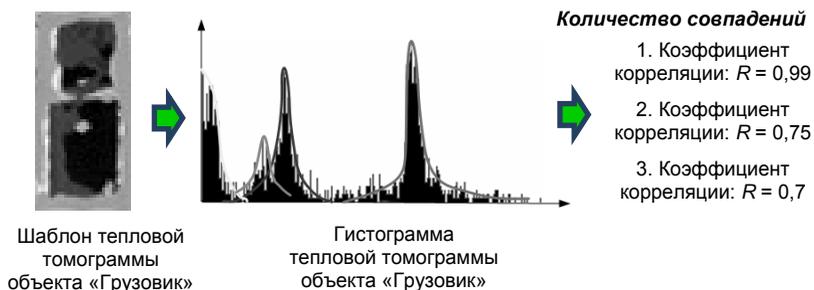


Рис. 1. Тепловая томограмма с обнаруженными на ней объектами

поиска стационарных и квазистационарных малозаметных (маскированных) техногенных объектов в ходе дистанционного мониторинга земной поверхности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-08-00053 А).

Список литературы

1. Корреляционная обработка кубоида инфракрасных изображений, получаемых с беспилотных летательных аппаратов. Часть 2. Метод обработки инфракрасных сигнатур эталонных объектов на основе численного решения нелинейной задачи теплообмена / И. Н. Ишук, А. М. Филимонов, К. В. Постнов, Е. А. Степанов, Д. Д. Дмитриев // Техника и технологии. – 2016. – № 9(3). – С. 376 – 384.
2. Cuboids of Infrared Images Reduction Obtained from Unmanned Aerial Vehicles / I. N. Ishchuk, A. M. Filimonov, V. N. Tyapkin, M. E. Semenov, E. A. Kabulova // Modern applied science. – 2015. – № 3(9). – P. 233 – 240.

SEARCH FOR OBJECTS IN THE THERMAL IMAGES ACCORDING TO THEIR HISTOGRAMS

I. N. Ischuk¹, D. D. Dmitriev¹, A. M. Filimonov²

*¹Siberian Federal University, Krasnoyarsk
boerby@rambler.ru*

*²Military Training and Research Center of the Air Force
“Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky
and Yu. A. Gagarin”, Voronezh*

Abstract. The main stages of construction of thermal tomograms according to remote monitoring of the earth's surface are described. The result of thermal tomogram processing using software and algorithmic software that implements the histogram method of searching for objects in the image by templates is also presented.

Keywords: infrared image, thermal tomography, object detection, histogram methods, image processing.

СПОСОБ КЛАССИФИКАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ПОСТРОЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ТЕПЛОВЫХ ТОМОГРАММ

И. Н. Ищук¹, В. Н. Тяпкин¹, А. А. Долгов², А. А. Бебенин²

¹Сибирский федеральный университет, Красноярск

²Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и
Ю. А. Гагарина», Воронеж
boerby@rambler.ru

Аннотация. Приводится постановка и решение задачи классификации малозаметных техногенных объектов на фоне земной поверхности на основе построения многослойных тепловых томограмм.

Ключевые слова: дистанционный мониторинг, теплофизические параметры, многослойная математическая модель.

В настоящее время в задачах дистанционного мониторинга (ДМ) земной поверхности с беспилотных летательных аппаратов все большее внимание уделяется использованию многоспектральных оптико-электронных средств (МОЭС). Их совместное применение позволяет решать ряд важнейших задач, например, таких, как обнаружение, распознавание и классификация малозаметных объектов, находящихся на земной поверхности, либо заглубленных в грунт, находящихся в условиях естественного теплообмена с окружающей средой.

1. Постановка задачи

В общем виде задачу классификации техногенных объектов (ТО) на фоне земной поверхности опишем в следующем виде:

$$R_i\{r_1, r_2 \dots r_n\} \rightarrow \Omega\{\omega_1, \omega_2 \dots \omega_m\}, \quad i \in [1 \dots N], \quad (1)$$

где R_i – классифицируемый ТО; $\{r_1, r_2 \dots r_n\}$ – совокупность информационных признаков; $\Omega\{\omega_1, \omega_2 \dots \omega_m\}$ – множество классов материалов, N – количество ТО.

Представим район дистанционного мониторинга (РДМ) в виде упрощенной двухслойной модели «ТО/фон», находящейся в естественных условиях теплообмена с окружающей средой. Тогда тепловой режим поверхностного слоя можно описать уравнением теплового баланса:

$$(1 - V)(F' + F'') - B_0^* = -\lambda_1(\theta) \left. \frac{\partial T_0}{\partial z} \right|_{z=0} + C^* \rho^* k \left. \frac{\partial T_0}{\partial z} \right|_{z=0} + L_p k \left. \frac{\partial s}{\partial z} \right|_{z=0}, \quad (2)$$

где V – альbedo; $(F' + F'')$ – суммарный поток солнечной радиации, приходящий на поверхность РДМ; $B_0^* = \delta(\sigma T_0^4 - \delta_a \sigma T_{\Pi}^4)$ – эффективное излучение верхнего слоя поверхности, δ – поглощательная способность верхнего слоя поверхности, σ – постоянная Стефана–Больцмана, δ_a – относительный коэффициент излучения атмосферы; $\lambda_1(\theta)$ – эффективная теплопроводность; $T_0 = T_0(x, y, \tau)$ – неизвестная функция температуры поверхностного слоя, $\tau \in [0, T]$ – временной интервал наблюдения; $\Theta(x, y, z) \in D_{\Theta} = \Omega \times [0, H]$ $\Theta(x, y, z)$ – вектор пространственных координат; D_{Θ} – множество допустимых значений Θ , Ω – поверхность полуограниченной среды; C^* – удельная изобарная теплоемкость воздуха; ρ^* – плотность воздуха; k – коэффициент турбулентности; L_p – удельная теплота парообразования; s – массовая доля водяного пара.

Распределение температурного поля в анизотропной неоднородной среде описывается уравнением:

$$C_{\rho j}(\theta) \frac{\partial T_j}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left([\lambda_j(\theta)]_{11} \frac{\partial T_j}{\partial x} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left([\lambda_j(\theta)]_{12} \frac{\partial T_j}{\partial y} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left([\lambda_j(\theta)]_{13} \frac{\partial T_j}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left([\lambda_j(\theta)]_{22} \frac{\partial T_j}{\partial y} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left([\lambda_j(\theta)]_{23} \frac{\partial T_j}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left([\lambda_j(\theta)]_{33} \frac{\partial T_j}{\partial z} \right), \quad (3)$$

где $C_{\rho j}$ – объемная теплоемкость среды; θ – эффективная температура;

$$\lambda_j(\theta) = \begin{pmatrix} \lambda_j(\theta)_{11} & \lambda_j(\theta)_{12} & \lambda_j(\theta)_{13} \\ \lambda_j(\theta)_{21} & \lambda_j(\theta)_{22} & \lambda_j(\theta)_{23} \\ \lambda_j(\theta)_{31} & \lambda_j(\theta)_{32} & \lambda_j(\theta)_{33} \end{pmatrix} - \text{тензор эффективной теплопроводности анизотропной среды.}$$

Значение эффективной теплопроводности $\lambda_j(\theta)$ можно вычислить с помощью эмпирического выражения [1]:

$$\lambda_j(\theta) = B_{0j} + B_{1j}\theta + B_{2j}\theta^{1/2}, \quad (4)$$

$$\text{где } B_{0j} = \begin{pmatrix} b_{0j}^{xx} & b_{0j}^{xy} & b_{0j}^{xz} \\ b_{0j}^{yx} & b_{0j}^{yy} & b_{0j}^{yz} \\ b_{0j}^{zx} & b_{0j}^{zy} & b_{0j}^{zz} \end{pmatrix}, B_{1j} = \begin{pmatrix} b_{1j}^{xx} & b_{1j}^{xy} & b_{1j}^{xz} \\ b_{1j}^{yx} & b_{1j}^{yy} & b_{1j}^{yz} \\ b_{1j}^{zx} & b_{1j}^{zy} & b_{1j}^{zz} \end{pmatrix}, B_{2j} = \begin{pmatrix} b_{2j}^{xx} & b_{2j}^{xy} & b_{2j}^{xz} \\ b_{2j}^{yx} & b_{2j}^{yy} & b_{2j}^{yz} \\ b_{2j}^{zx} & b_{2j}^{zy} & b_{2j}^{zz} \end{pmatrix} -$$

матрицы эмпирических коэффициентов.

Граничные и начальные условия сопряжения слоистых сред выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} \lambda_j(\theta) \frac{\partial T_j}{\partial z} \Big|_{z=h_j} &= \frac{1}{R_T} (T_{j+1} \Big|_{z=+\Delta h_j} - T_j \Big|_{z=-\Delta h_j}); \\ \lambda_j(\theta) \frac{\partial T_j}{\partial z} \Big|_{z=-\Delta h_j} &= \lambda_{j+1}(\theta) \frac{\partial T_{j+1}}{\partial z} \Big|_{z=+\Delta h_j}; \\ T_N \Big|_{z=H} &= \Phi_1(x, y, H); \\ T_0 \Big|_{z=0} &= \Phi_0(x, y, 0), \end{aligned} \quad (5)$$

где R_T – коэффициент термического сопротивления; $\Phi_1(x, y, H)$, $\Phi_0(x, y, 0)$ – известные функции начального распределения температур на верхней и нижней границах слоя.

2. Решение задачи и результаты экспериментальной апробации

При проведении ДМ БПЛА с МОЭС получают множество пространственно-временных ИК-изображений радиационного температурного поля поверхности РДМ – кубоид ИК-изображений.

Преобразование значений радиационного температурного поля в значения термодинамического температурного поля на поверхности РДМ выполняется в соответствии с системой уравнений:

$$\begin{aligned} T_{td} &= \sqrt[4]{\frac{T_r^4 - (1 - \varepsilon) T_a^4}{\varepsilon}}; \\ \tilde{T} &= T_{td} - T_{td\min}, \end{aligned} \quad (6)$$

где T_{td} – значение термодинамической температуры в точке $g(x, y) \in G$; $T_{td\min}$ – минимальное значение термодинамической температуры поверхности РДМ. В результате преобразования (6) получим кубоид термодинамических температурных изображений $\tilde{T}(x, y, \tau)$.

Построение пространственного распределения ТФП РДМ осуществляется на основе редукции кубоида ИК-изображений:

$$A_\xi^{-1}(\tilde{T}(x, y, \tau)) = \begin{bmatrix} f_\lambda(x, y) \\ f_a(x, y) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где $f_\lambda(x, y)$ – тепловая томограмма теплопроводности; $f_a(x, y)$ – тепловая томограмма температуропроводности, A_ξ^{-1} – обратный оператор, реализующий корректное обратное решение по минимальному значению невязки, зависящей от регуляризирующего параметра ξ , на основе численного решения многопараметрической оптимизационной задачи:

$$J(f) = \int_0^T \iint_G \left(\xi_1 \|T_0[\psi: f] - \tilde{T}\|^2 + \xi_2 \left\| \frac{dT_0[\psi: f] - d\tilde{T}}{d\tau} \right\|^2 \right) dx dy d\tau \rightarrow \min_{f \in D_f}, \quad (8)$$

где $\psi\{\Lambda, l, Q_\Sigma, Ff, T_A\}$ – вектор оптимизируемых параметров математической модели для поверхности РДМ; $\Lambda\{\lambda_1, \lambda_2, C_1, C_2, \rho_1, \rho_2\}$ – совокупность ТФП двухслойной модели (теплопроводность, удельная теплоемкость, плотность первого и второго слоев соответственно); l – глубина моделирования; Q_Σ – поток суммарной солнечной радиации, приходящей на поверхность РДМ; Ff – скорость ветра в приземном слое; T_A – температура воздуха в приземном слое; ξ_1, ξ_2 – весовые коэффициенты; $T[\psi]$ – температурное поле, полученное решением прямой задачи теплопроводности численными методами; $f = \begin{bmatrix} f_\lambda(x, y) \\ f_a(x, y) \end{bmatrix}$ – матрица пространственного распределения ТФП на поверхности РДМ; G – площадь РДМ; D_f – множество допустимых значений f .

Для экспериментальной апробации были взяты эталонные материалы с известными значениями ТФП: пенопласт, дерево, сталь, которые были разложены на поверхности грунта (рис. 1).

На рисунке 2 представлен результат решения задачи (1) на основе численного решения коэффициентно-обратной задачи теплопроводности (КОЗТ) путем решения многопараметрической оптимизационной задачи (8) с применением генетического алгоритма поисковой оптимизации.

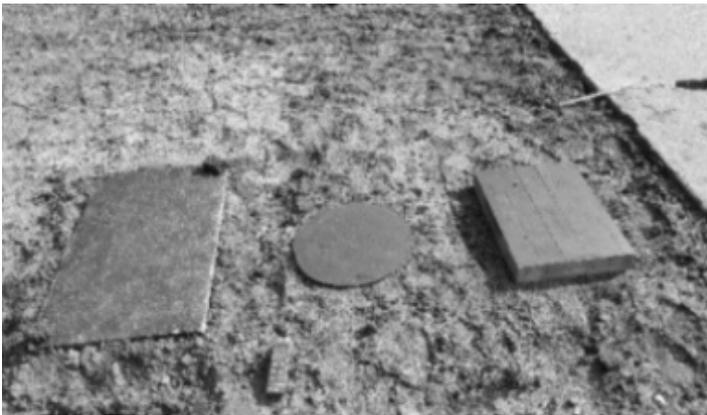
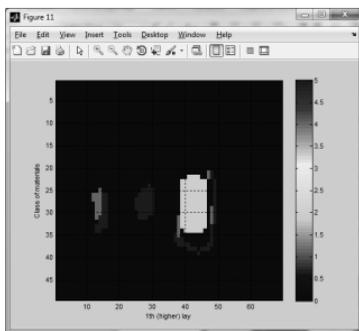
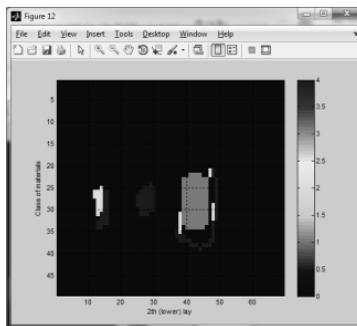


Рис. 1. Размещение эталонных материалов на поверхности грунта



а)



б)

Рис. 2. Пространственное распределение ТФП в РДМ в псевдоцветах классов материалов:

1 – пенопласт; 2 – дерево, пенобетон; 3 – бетон; 4 – грунт; 5 – металл;
а – верхний слой, глубина до 0,1 м; б – нижний слой, глубина более 0,1 м

Заключение. Таким образом, произведена постановка и решение задачи классификации ТО на фоне земной поверхности. В ходе произведенного расчета были получены пространственные распределения ТФП (теплопроводность, температуропроводность) в РДМ, отнесенные к заданным классам материалов. Результаты, полученные в ходе экспериментальной апробации, свидетельствуют об адекватности примененной для расчета математической модели.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-08-00053 А).

Список литературы

1. Šimůnek J., M. Th. van Genuchten and M. Šejna. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Version 3.0. / J. Šimůnek, M. Th. van Genuchten, M. Šejna. – California: Preprint Department of environmental sciences university of California riverside, 2005. – P. 270.
2. Saito H. Numerical analyses of coupled water, vapor and heat transport in the vadose zone / H. Saito, J. Šimůnek, B. Mohanty // *Vadose Zone J.* – 2006. – N 5. – P. 784 – 800.
3. Способ классификации стационарных и квазистационарных объектов по данным динамических инфракрасных изображений, получаемых комплексами с беспилотными летательными аппаратами / И. Н. Ишук, А. М. Филимонов, Е. А. Степанов, К. В. Постнов // *Радиотехника.* – 2016. – № 10. – 145 – 151.
4. Способ классификации объектов оптико-электронными системами разведки на основе обработки многоспектрального кубоида изображений /

И. Н. Ишук, Е. А. Степанов, А. А. Бебенин, Д. Д. Дмитриев, А. М. Филимонов // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2017. – Т. 10, № 2. – С. 183 – 190.

5. Обработка изображений в инфракрасном диапазоне волн на основе идентификации тепловых свойств скрытых подповерхностных объектов / И. Н. Ишук, Ю. Ю. Громов, Т. Г. Самхарадзе, А. И. Фесенко // Инженерная физика. – 2009. – № 2. – С. 3 – 11.

METHOD OF CLASSIFICATION OF TECHNOGENIC OBJECTS ON THE BASIS OF CONSTRUCTION OF MULTILAYER THER- MAL TOMOGRAMS

I. N. Ischuk¹, V. N. Tyapkin¹, A. A. Dolgov², A. A. Bebenin²

¹Siberian Federal University, Krasnoyarsk

²Military Educational and Scientific Center of the Air Force

N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy, Voronezh

Abstract. The article presents the formulation and solution of the problem of classification of unobtrusive man-made objects on the background of the earth's surface based on the construction of multilayer thermal tomograms.

Keywords: remote monitoring, thermophysical parameters, multilayer mathematical model.

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЕЙ МНОГОСЛОЙНЫХ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

А. И. Казьмин, П. А. Федюнин

*Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и
Ю. А. Гагарина», Воронеж
alek-kazmin@yandex.ru*

Аннотация. Представлен новый СВЧ-метод измерения диэлектрической и магнитной проницаемостей многослойных радиопоглощающих покрытий.

Ключевые слова: многослойное радиопоглощающее покрытие, диэлектрическая проницаемость, магнитная проницаемость, измерение, дисперсионное уравнение, метод поперечного резонанса.

Для разработки сверхширокополосных (СШП) антенных систем является актуальным снижение коэффициента отражения электромагнитной волны от металлической платформы, на которой установлена СШП антенная система [1]. Последнее достигается применением на платформе СШП многослойных радиопоглощающих покрытий (РПП) [1].

При разработке подобных РПП помимо оценки их теплофизических свойств, важнейшее значение приобретают данные о температурной зависимости их диэлектрической и магнитной проницаемостей [1].

Основу предлагаемого метода измерения составляет электродинамическая модель на основе дисперсионных уравнений, позволяющая связать электрофизические параметры многослойного РПП с коэффициентом нормального ослабления поля поверхностной медленной электромагнитной волны (ПМЭМВ).

На рисунке 1, а приведена геометрия задачи нахождения дисперсионного уравнения многослойного РПП на металлическом основании с числом слоев n .

В качестве дисперсионного уравнения для собственных волн в многослойном РПП может использоваться уравнение поперечного резонанса [2], записанное относительно произвольно выбранного опорного сечения y_0 :

$$\vec{Z}_{up}(y) + \vec{Z}_{down}(y) = 0, \quad (1)$$

где $\vec{Z}_{up}(y)$ и $\vec{Z}_{down}(y)$ – эквивалентные характеристические сопротивления «вверх» и «вниз» относительно опорного сечения y_0 .

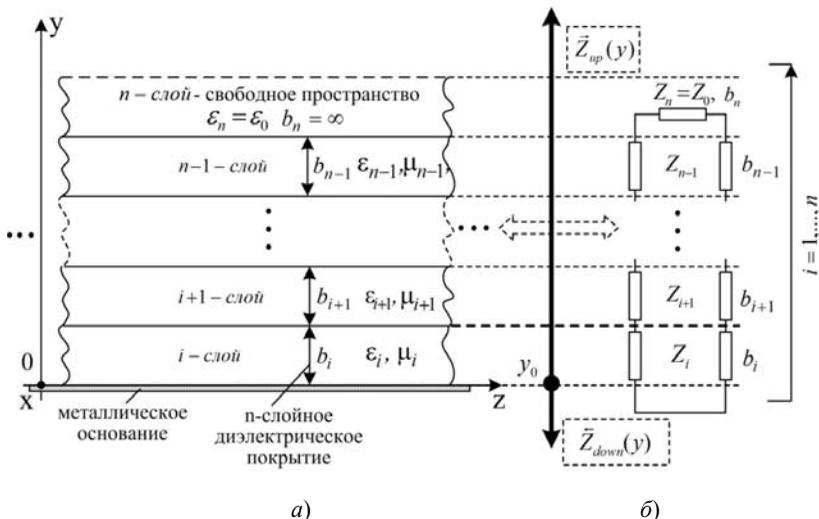


Рис. 1. Геометрия исследуемой системы:

a – многослойное диэлектрическое покрытие; *б* – его эквивалентная схема

Характеристические сопротивления для Е-волн имеют следующий вид:

– слой свободного пространства $\left(y > \sum_{i=1}^n b_i \right)$:

$$Z_{En} = Z_0 = -j \frac{\alpha_y}{\omega \epsilon_0}, \quad (2)$$

где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота; ϵ_0 – диэлектрическая постоянная; α_y – коэффициент ослабления поля ПМЭМВ;

– каждый слой многослойного диэлектрического покрытия:

$$Z_{Ei} = \frac{q_i}{\omega \epsilon_0 \epsilon_i}, \quad i = 1, \dots, n-1, \quad (3)$$

где q_i – коэффициент фазы ПМЭМВ, $q_i = \sqrt{k_i^2 - k_0^2 - \alpha_y^2}$,

$i = 1, \dots, n-1$, n – количество слоев покрытия, k_i – волновое число i -

слоя покрытия, $k_i = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_i \mu_i}$, ϵ_i и μ_i – относительная диэлектрическая и магнитная проницаемости i -слоя покрытия соответственно.

Характеристическое сопротивление «вверх» $\bar{Z}_{up}(y)$ относительно опорного сечения y_0 представляет собой эквивалентное характеристическое сопротивление слоев с $i=1, \dots, n$. Его можно получить путем последовательного применения формулы трансформации волновых сопротивлений методом теории цепей [2]:

$$\bar{Z}(i, i+1) = Z_i \frac{Z_{i+1} + jZ_i \operatorname{tg}(q_i b_i)}{Z_i + jZ_{i+1} \operatorname{tg}(q_i b_i)}, \quad (4)$$

где $\bar{Z}(i, i+1)$ – характеристическое сопротивление i -слоя покрытия, нагруженного на характеристическое сопротивление $i+1$ -слоя покрытия; \bar{Z}_i – характеристическое сопротивление i -слоя покрытия; \bar{Z}_{i+1} – характеристическое сопротивление $i+1$ -слоя покрытия; b_i – толщина i -го слоя.

Итоговое дисперсионное уравнение для многослойного РПП на основе (4) может быть представлено в следующем виде:

$$\bar{Z}(i, \dots, n) = 0, \quad (5)$$

где $\bar{Z}(i, \dots, n)$ – эквивалентное характеристическое сопротивление слоев покрытия (i, \dots, n) , определяемое по рекурсивной формуле (4).

Метод включает в себя следующие этапы.

Этап 1. Для нахождения относительных диэлектрических ε_i и магнитных проницаемостей μ_i всех слоев многослойного диэлектрического покрытия – $i=1, \dots, n$, в нем последовательно возбуждаются ПМЭМВ E -типа на $2n$ длинах волн генератора $\lambda_j, \lambda_{j+1}, \dots, \lambda_{2n-1}, \lambda_{2n}$.

Для каждой длины волны $\lambda_j, \lambda_{j+1}, \dots, \lambda_{2n-1}, \lambda_{2n}$ производят измерение напряженности поля $E_{\lambda_j}(y)$ ПМЭМВ по нормали к поверхности многослойного покрытия (в точке y). Делают шаг $\Delta y = s$ и измеряют напряженность поля ПМЭМВ в точке $y+s$ – $E_{\lambda_j}(y+s)$ [3].

Производится расчет коэффициентов нормального ослабления α_y для каждой длины волны $\lambda_j, \lambda_{j+1}, \dots, \lambda_{2n-1}, \lambda_{2n}$ [3].

Этап 2. Для каждого значения коэффициента ослабления $\alpha_{y_{\lambda_j}}, \alpha_{y_{\lambda_{j+1}}}, \dots, \alpha_{y_{\lambda_{2n-1}}}, \alpha_{y_{\lambda_{2n}}}$ поля ПМЭМВ составляется характеристическое уравнение вида (5).

Этап 3. Решение системы из $2n$ характеристических уравнений для $\alpha_{y_{-\lambda j}}, \alpha_{y_{-\lambda j+1}}, \dots, \alpha_{y_{-\lambda 2n-1}}, \alpha_{y_{-\lambda 2n}}$ позволяет определить относительные диэлектрические ϵ_i и магнитные проницаемости μ_i всех слоев многослойного диэлектрического покрытия $i = 1, \dots, n$.

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. Andreas Patrovsky. Dielectric Slab Mode Antenna for Integrated Millimeter-wave Transceiver Front-ends / Andreas Patrovsky, Ke Wu // Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering. – 2013. – № 1(3). – P. 88 – 93.
3. Федюнин, П. А. Способы радиоволнового контроля параметров защитных покрытий авиационной техники / П. А. Федюнин, А. И. Казьмин. – М.: Физматлит, 2013. – 190 с.

METHOD MEASUREMENT OF PERMITTIVITY AND PERMEABILITY OF MULTILAYER RADIO ABSORBING COATINGS

A. I. Kaz'min, P. A. Fedjunin

*Military Educational and Scientific Center of the Air Force
“N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy”, Voronezh*

Abstract. The new method measurement of permittivity and permeability of multilayer radio absorbing coatings is presented.

Keywords: multilayer radio absorbing coatings, permittivity, permeability, measurement, dispersion equation, transverse resonance technique.

АППАРАТНАЯ ПОДДЕРЖКА БЛОЧНОГО АЛГОРИТМА СЖАТИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

А. В. Левенец, Чье Ен Ун

*Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск
levalvi@mail.ru; chye@ais.khstu.ru*

Аннотация. Предложен способ организации аппаратной поддержки алгоритма блочного сжатия кадров измерительных данных, построенного на основе геометрического подхода. Предложена структурная схема устройства аппаратной поддержки и дано описание его функционирования.

Ключевые слова: информационно-измерительная система, измерительные данные, сжатие данных, аппаратная поддержка, блочный алгоритм сжатия.

Одной из важных проблем информационно-измерительных систем (ИИС) в настоящее время остается обеспечение оптимального баланса между экономической и функциональной эффективностью таких систем. Традиционно снижение стоимости ИИС осуществлялось за счет применения алгоритмов сжатия, позволяющих уменьшать объемы устройств хранения данных, применять более низкоскоростные каналы связи и т.д. В силу этого разработка средств аппаратной поддержки является актуальной задачей.

Большинство современных алгоритмов сжатия ориентированы на работу с одним источником данных, что ограничивает эффективность сжатия данных в телеметрических системах, где существует корреляционная связь между различными источниками информации. В ряде работ, например, в [1, 2] предлагается при сжатии учитывать корреляционные связи между элементами массива сжимаемых данных, однако такое предложение в первую очередь связывается со сжатием видеоданных.

В качестве выхода из этой ситуации можно предложить рассматривать совокупность данных от различных источников как единый информационный объект с временными и пространственными корреляционными взаимосвязями. Это утверждение обуславливается тем, что взаимосвязи между разными источниками информации могут проявиться как за счет физических взаимодействий между составляющими элементами измерительного объекта, так и за счет технических решений, положенных в основу ИИС. К особенностям телеметрических данных сложных технических систем следует отнести наличие корреля-

ляции не только между отсчетами одного датчика в соседних кадрах, но и между отсчетами внутри кадра [3].

Таким образом, в общем случае сжимаемый кадр можно представить как один объект, внутренняя структура которого может быть изменена некоторым обратимым способом. Например, можно представить все данные кадра в виде битовой последовательности, которая впоследствии может быть преобразована по заданным законам в геометрически более сложные структуры, которые, при условии простоты их описания, будут подвергаться процедуре сжатия с большим эффектом, чем исходный кадр данных. Очевидно, что размерность формируемой структуры данных будет существенно зависеть как от числа источников информации, размещенных в кадре, так и от степени их корреляции.

Одним из способов, реализующих такой подход, является способ блочного сжатия, суть которого состоит в проведении анализа зависимости не только между показаниями конкретных датчиков в соседних отсчетах, но и учете взаимосвязи отсчетов от разных датчиков внутри кадра [4]. Эффективность сжатия данных здесь повышается за счет объединения отсчетов некоторых датчиков в блоки и применения разностного сжатия для этих блоков в целом. В этом случае, если два таких блока в соседних кадрах одинаковы, для их описания достаточно одного бита. При реализации предложенного способа следует учитывать, что для эффективной работы алгоритма следует набрать статистические данные о слабо изменяющихся областях в кадре.

Структурная схема двухуровневого устройства сжатия, поддерживающего блочный алгоритм сжатия, представлена на рис. 1. На схе-

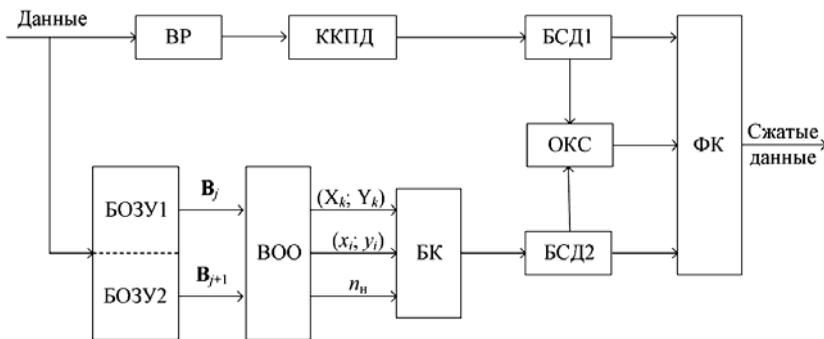


Рис. 1. Структурная схема устройства сжатия

ме приняты следующие обозначения: ВР – блок вычисления разности, ККПД – блок кодирования кодом переменной длины, БСД – буфер сжатых данных, БОЗУ – буферное ОЗУ, ВОО – блок выделения однородных областей, БК – блок кодирования, ОКС – блок оценки коэффициента сжатия, ФК – формирователь кадра.

Работа устройства происходит следующим образом. Данные одновременно поступают на блок ВР, где происходит вычисление разности для каждого из источников, и записываются в блок буферной памяти. После блока ВР полученная разность записывается в буфер БСД1. В блоке БОЗУ накапливается два кадра данных \mathbf{V}_j и \mathbf{V}_{j+1} , после чего блок ВОО анализирует кадры и выделяет области, не изменившие свои значения. На выходе ВОО выдает адрес выделенной области (X_k, Y_k) , число неоднородных бит в этой области n_n и их адреса (x_i, y_i) . Под неоднородными битами здесь понимаются биты, отличающиеся от значения области в целом. Так, если выделяется однородная нулевая область, неоднородными будут считаться единичные биты в этой области.

Данные от блока ВОО поступают на блок кодирования, где к ним применяют выбранный способ кодирования (например, тот же код переменной длины). Закодированные данные поступают в буфер БСД2. После завершения кодирования кадра данных, блок оценки эффективности ОКС анализирует данные, помещенные в буферы БСД1 и БСД2, и принимает решение о выборе способа сжатия. Формирование кадра сжатых данных происходит в блоке ФК.

Таким образом, для организации эффективного сжатия измерительных данных, подсистема сжатия должна быть организована в виде адаптивной многоуровневой системы, обеспечивающей поиск корреляционных связей между данными не только одного источника, но внутри кадров данных, а также между соседними кадрами данных. В качестве алгоритма первого уровня следует рекомендовать известный разностный метод. Примером алгоритма второго уровня может служить блочный алгоритм, организация аппаратной поддержки которого представляет собой достаточно простую задачу.

Список литературы

1. Ольховский, Ю. Б. Сжатие данных при телеизмерениях / Ю. Б. Ольховский, О. Н. Новоселов, А. П. Мановцев. – М.: Советское радио, 1971. – 304 с.
2. Победоносцев, В. А. Основания информметрии / В. А. Победоносцев. – М.: Радио и связь, 2000. – 192 с.

3. Чье, Ен Ун. Представление телемеханических данных однородными n -мерными структурами как предварительная обработка в задачах сжатия / Чье Ен Ун, А. В. Левенец, В. В. Нильга // Информационно-управляющие системы. – 2011. – № 6. – С. 7 – 10.

4. Левенец, А. В. Методы и алгоритмы сжатия измерительных данных в информационно-измерительных системах / А. В. Левенец, Ен Ун Чье. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2016. – 200 с.

HARDWARE SUPPORT FOR ALGORITHM OF MEASUREMENT DATA BLOCK COMPRESSION

A. V. Levenets, Chye En Un

Pacific National University, Khabarovsk

Abstract. The article proposes a method of organizing hardware support for the algorithm of block compression of measurement data frames, built on the basis of the geometric approach. The block diagram of the device of hardware support is offered and the description of its functioning is given.

Key words: information-measuring system, measurement data, data compression, hardware, algorithm of block compression.

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЛЩИНЫ
ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ
НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОСНОВАНИЯХ**

**Н. Ф. Майникова, И. В. Рогов, А. Ю. Ярмизина,
В. Д. Попов, Д. В. Трофимов**

*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный
технический университет», Тамбов
maynikova.nf@yandex.ru*

Аннотация. Представлены постановка и решение краевой задачи нестационарного теплопереноса применительно к двухслойным изделиям.

Ключевые слова: краевая задача, математическая модель, неразрушающий контроль, тепловой метод, теплопроводность, защитное покрытие.

Применение в методах неразрушающего контроля теплового воздействия постоянной мощности от круглого плоского нагревателя в виде диска, встроенного в подложку измерительного зонда, достаточно обосновано и полно представлено в работах [1 – 4].

Схема используемой в рассматриваемом случае двухслойной системы, включающей в себя исследуемую низкотеплопроводную пластину толщиной h_1 и металлическое основание (полуограниченное тело), представлена на рис. 1.

В начальный момент времени на свободной поверхности пластины (при $x = 0$) действует постоянный тепловой поток $q = \text{const}$, который действует на протяжении всего процесса нагрева. Боковые поверхности тел имеют тепловую изоляцию ($q = 0$).

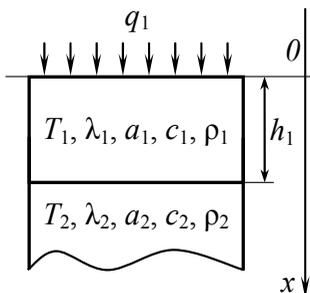


Рис. 1. Тепловая схема метода

Математическая модель распределения тепла в рассматриваемой системе может быть записана в виде прямой задачи теплопроводности (1 – 7):

$$\frac{\partial T_1(x, \tau)}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 T_1(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad \tau > 0, \quad 0 < x < h_1; \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_2(x, \tau)}{\partial \tau} = a_2 \frac{\partial^2 T_2(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad \tau > 0, \quad h_1 < x < \infty; \quad (2)$$

$$T_1(x, 0) = T_2(x, 0) = 0; \quad (3)$$

$$T_1(h_1, \tau) = T_2(h_1, \tau); \quad (4)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(h_1, \tau)}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2(h_1, \tau)}{\partial x}; \quad (5)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1(0, \tau)}{\partial x} = q; \quad T_2(\infty, \tau) = 0. \quad (6,7)$$

где $T_1(x, \tau)$, $T_2(x, \tau)$ – соответственно температурные поля исследуемого покрытия и основания в точках с координатами x в моменты времени τ ; h_1 – толщина исследуемого покрытия; q – тепловой поток, подводимый к свободной поверхности исследуемой пластины в точке $x = 0$; λ_1 , λ_2 , a_1 , a_2 – коэффициенты теплопроводности и температуропроводности соответственно исследуемого покрытия и металлического основания.

Введем обозначения:

$$Fo = \frac{a_1 \tau}{(h_1)^2}, \quad \tilde{x} = \frac{x}{h_1}, \quad K_\lambda = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}, \quad K_a = \frac{a_1}{a_2}, \quad \Theta_1 = \frac{T_1 \lambda_1}{q h_1}, \quad \Theta_2 = \frac{T_2 \lambda_1}{q h_1},$$

где Fo – безразмерное время; \tilde{x} – безразмерная координата; K_λ , K_a – относительные теплопроводность и температуропроводность тел; Θ_1 и Θ_2 – значения температуры в безразмерном представлении для тел.

Тогда краевую задачу (1) – (7) можно записать в безразмерном виде:

$$\frac{\partial \Theta_1(\tilde{x}, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 \Theta_1(\tilde{x}, Fo)}{\partial \tilde{x}^2}, \quad Fo > 0, \quad 0 < \tilde{x} < 1; \quad (8)$$

$$\frac{\partial \Theta_2(\tilde{x}, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 \Theta_2(\tilde{x}, Fo)}{\partial \tilde{x}^2} \frac{1}{K_a}, \quad Fo > 0, \quad 1 < \tilde{x} < \infty; \quad (9)$$

$$\Theta_1(\tilde{x}, 0) = \Theta_2(\tilde{x}, 0) = 0; \quad (10)$$

$$\Theta_1(1, Fo) = \Theta_2(1, Fo); \quad (11)$$

$$K_\lambda \frac{\partial \Theta_1(1, Fo)}{\partial \tilde{x}} = \frac{\partial \Theta_2(1, Fo)}{\partial \tilde{x}}; \quad (12)$$

$$-\frac{\partial \Theta_1(0, Fo)}{\partial \tilde{x}} = 1; \quad \Theta_2(\infty, Fo) = 0. \quad (13,14)$$

Получив решение задачи в безразмерном виде и перейдя к размерным величинам, после ряда преобразований и упрощений при больших τ :

$$T_1(0, \tau) = \frac{2q}{\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{\tau}}{\varepsilon_2} + \left(1 - \frac{\varepsilon_1^2}{\varepsilon_2^2}\right) \frac{qh_1}{\lambda_1}. \quad (15)$$

Найденное выражение автоматически распространяется на бесконечное множество тепловых явлений применительно к схеме (рис. 1). Выражение (15) представляет собой линейную зависимость вида:

$$T(0, \tau) = b_1 \sqrt{\tau} + b_0, \quad \text{где} \quad b_1 = \frac{2q}{\sqrt{\pi} \varepsilon_2}. \quad (16)$$

Объект исследования – двухслойное тело, первый слой которого низкотеплопроводный, а второй – высокотеплопроводный.

Следовательно,

$$b_0 = \left(1 - \frac{\varepsilon_1^2}{\varepsilon_2^2}\right) \frac{qh_1}{\lambda_1} \approx \frac{qh_1}{\lambda_1}. \quad (17)$$

Из выражения (17) следует, что

$$h_1 = \frac{\lambda_1 b_0}{q}. \quad (18)$$

Из выражения (18) можно определить толщину первого тела, если известны его теплофизические свойства или теплофизические свойства первого тела при известной толщине h_1 .

Список литературы

1. Моделирование теплопереноса в методе неразрушающего контроля двухслойных материалов / Н. П. Жуков, Н. Ф. Майникова, И. В. Рогов, А. О. Антонов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2013. – Т. 19, № 3. – С. 506 – 511.
2. Лыков, А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967.– 559 с.

3. Моделирование теплопереноса применительно к неразрушающему контролю двухслойных объектов / Н. Ф. Майникова, В. Д. Попов, Д. В. Трофимов // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн: сб. материалов 2-й Международной научно-практической конференции. – 2016. – С. 150 – 154.

4. 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.

THEORETICAL SUBSTANTIATION OF THE METHOD OF NONDESTRUCTIVE DETERMINATION OF THE THICKNESS OF POLYMER COATINGS ON METAL SUBSTRATES

**N. F. Mainikova, I. V. Rogov, A. Yu. Yarmizina,
V. D. Popov, D. V. Trofimov**
Tambov State Technical University, Tambov

Abstract. Statement and the solution of a boundary value problem of nonstationary heat transfer in relation to double-layer products are presented.

Keywords: the boundary value problem, the mathematical model, nondestructive testing, thermal method, the thermal conductivity, the protective coating.

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ СТРУКТУРНЫХ ПЕРЕХОДОВ В ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛАХ

С. В. Мищенко, Н. Ф. Майникова, О. Н. Попов, Д. О. Завражин
*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный
технический университет», Тамбов
maynikova.nf@yandex.ru*

Аннотация. Представлены описание измерительной системы и примеры реализации неразрушающего контроля структурных переходов в полимерных материалах.

Ключевые слова: измерительная система, неразрушающий контроль, полимерный материал, структурный переход, теплофизические свойства.

Физическая структура полимеров характеризуется взаимным расположением макромолекул и их частей, в частности, кристаллической и аморфной структурами. Число кристаллических и аморфных форм в полимерах огромно, что обуславливает различные физические свойства, а также многообразие релаксационных явлений в полимерах. Известно влияние процессов релаксации на скорость механизма разрушения, долговечность и прочность конкретных изделий из полимерных материалов (ПМ). Практическое использование ПМ невозможно без глубокого изучения суперпозиций их состояний и переходов, информация о которых необходима для назначения технологических режимов их переработки и определения условий эксплуатации изделий [1].

Известны контактные методы теплового неразрушающего контроля (НК) структурных переходов в ПМ по изменениям их теплофизических свойств (ТФС), базирующиеся на моделях плоского и сферического полупространств, при воздействии на поверхность объекта исследования от круглого источника тепла постоянной мощности в виде диска, встроенного в подложку измерительного зонда (ИЗ). Однако данные методы имеют существенные ограничения по времени и температуре, так как в методе реализуется квазистационарная стадия. В то же время достичь увеличения скорости нагрева поверхности объекта исследования, уменьшения ограничений по времени и температуре при НК возможно при использовании теплопереноса от иных источников тепла без реализации квазистационарной стадии нагрева [2, 3].

В данной работе представлен результат экспериментальной реализации метода неразрушающего контроля (НК) структурных переходов в ПМ, теоретическое обоснование которого представлено в работе [2].

Современные методы НК, позволяющие определять температурные характеристики структурных переходов в ПМ, наиболее эффективно реализуются измерительными системами (ИС), позволяющими автоматизировать проведение измерений, адаптивно изменять режимные параметры, обеспечивать оперативность и точность измерений при сохранении целостности объектов исследования и их эксплуатационных характеристик.

Схема ИС, реализующей метод НК структурных переходов в ПМ, представлена на рис. 1.

ИС состоит из персонального компьютера (ПК), измерительно-управляющей платы, измерительного зонда (ИЗ), блока управления питанием (БУП). ИЗ обеспечивает создание теплового воздействия на исследуемый объект с помощью двух нагревателей (Н1, Н2) в виде узкой полосы каждый.

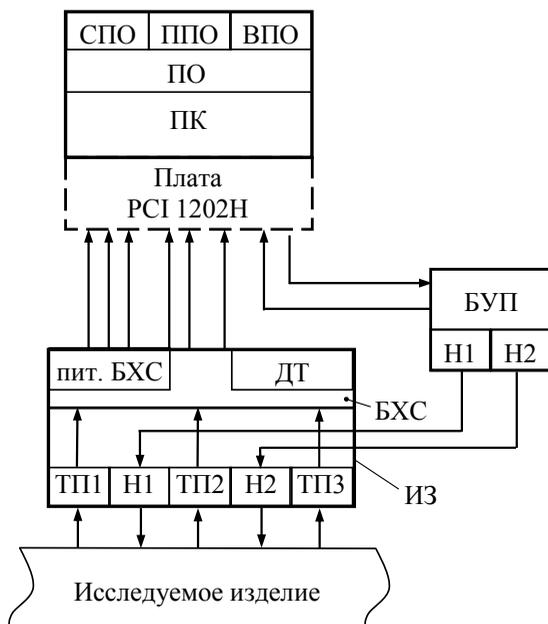


Рис. 1. Структурная схема ИС

Фиксирование температуры в точках контроля поверхности исследуемого изделия осуществляется термопреобразователями (ТП1 – ТП3).

Сформулирована краевая задача теплопроводности, получено ее аналитическое решение применительно к распространению тепла в полимерном теле от двух источников постоянной мощности в виде узкой полосы каждый. Данное решение позволяет при одномерном распространении тепла в цилиндрическом полупространстве от каждого нагревателя и реализации режима регуляризации тепловых потоков в локальной области объекта исследования, применив принцип суперпозиции к температурным полям, определить температурные характеристики структурных переходов как твердофазных, так и релаксационных, в изделиях из ПМ [2, 3]. В методе регистрируется термограмма нагрева поверхности объекта в точке, расположенной между нагревателями, а обработку термограммы ведут по разработанной модели, с определением температуры структурного перехода по аномалиям теплофизических свойств (ϵ , λ , a , c – тепловой активности, теплопроводности, температуропроводности и теплоемкости), коэффициентов математической модели b_1 и b_0 (или их дисперсий) на температурных зависимостях [2, 3].

На рисунке 2 представлены зависимости $\epsilon_i^* = f(T_S)$ и $c_i^* = f(T_S)$ для изделия из поликапроамида (ПА6). Графики построены по термограмме, зафиксированной ТП2, расположенным на горизонтальной (центральной) оси контактной поверхности ИЗ между нагревателями. Условия экспериментов: мощность на нагревателях: $P_1 = 0,86$ Вт и $P_2 = 0,73$ Вт; временной шаг измерения температуры $\Delta t = 0,3$ с; начальная температура опыта, $T_n = 19,5$ °С; толщина исследуемого изделия $18,5 \cdot 10^{-3}$ м.

На представленных зависимостях зафиксированы релаксационные переходы в ПА6 при $T_n = 27,1$ °С ($v = 2$ °С/мин). Полученные результаты хорошо согласуются с данными. Известно, что в ПА6 релаксационный α -переход связан с сегментальным движением в аморфной части полимера [1].

На рисунке 3 представлены зависимости $b_{1i} = f(T_S)$ и $b_{0i} = f(T_S)$ для изделия из ПА6. Графики построены по термограмме, зафиксированной ТП2. Условия экспериментов: мощность на нагревателях: $P_1 = P_2 = 0,76$ Вт; временной шаг измерения температуры $\Delta t = 1$ с; начальная температура опыта, $T_n = 20$ °С; толщина исследуемого изделия $18,5 \cdot 10^{-3}$ м.

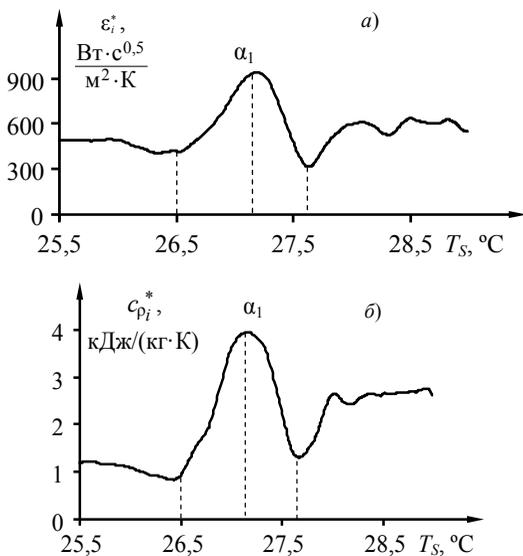


Рис. 2. Зависимости:

$a - \epsilon^* = f(T_s)$; $b - c_p^* = f(T_s)$. Объект – ПА6

На представленных зависимостях зафиксированы твердофазные переходы в ПА6 при $T_{\text{п}} = 25,1^{\circ}\text{C}$ ($v = 2,5^{\circ}\text{C}/\text{мин}$). Полученные результаты хорошо согласуются с данными. Известно, что в ПА6 в твердофазный переход обусловлен переходом одной кристаллической формы (гексагональная решетка) в другую (моноклинная решетка).

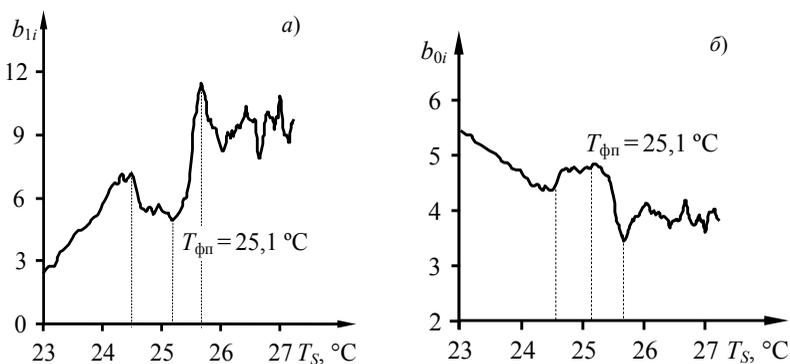


Рис. 3. Зависимости:

$a - b_{1i} = f(T_s)$; $b - b_{0i} = f(T_s)$. Объект – ПА6

Следует отметить, что разработанная математическая модель распространения тепла в объекте контроля, отличаемой которой является использование стадии регуляризации теплопереноса в локальной области исследуемого тела, расположенной между двумя нагревателями бесконечной длины, позволяет снизить ограничения на толщину исследуемого полимерного объекта, увеличить сигнал на термоприемнике без значительного увеличения напряжения на нагревателях.

Таким образом показана возможность неразрушающего контроля значения температуры структурного перехода (фазового или релаксационного) в полимерных материалах разработанным способом.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ВУЗа на 2017 – 2019 гг. № 9.7746.2017/БЧ.

Список литературы

1. Карташов, Э. М. Структурно-статистическая кинетика разрушения полимеров / Э. М. Карташов, Б. Цой, В. В. Шевелев. – М.: Химия, 2002. – 736 с.
2. Математическое моделирование теплопереноса от двух нагревателей в полуграниченном теле / Н. П. Жуков, Н. Ф. Майникова, И. В. Рогов, О. Н. Попов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2012. – Т. 18, № 2. – С. 327 – 332.
3. Многомодельные методы в микропроцессорных системах неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов: учебное пособие / С. В. Мищенко, Ю. Л. Муромцев, Н. П. Жуков, Н. Ф. Майникова, И. В. Рогов, О. Н. Попов; под ред. С. В. Мищенко. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ГГТУ», 2012. – 112 с.

NON-DESTRUCTIVE THERMO-PHYSICAL CONTROL STRUCTURAL TRANSITIONS IN POLYMERIC MATERIALS

S. V. Mishchenko, N. F. Mainikova, O. N. Popov, D. O. Zavrazhin

Tambov State Technical University, Tambov

maynikova.nf@yandex.ru

Abstract. The description of the measuring system and examples of non-destructive testing of structural transitions in polymeric materials are presented.

Keywords: measuring system, non-destructive testing, polymer material, structural transition, thermal properties.

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ЕМКОСТЬ С ДИСТАНЦИОННЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ ОБЪЕМА

М. М. Мордасов, М. Д. Мордасов
ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный
технический университет», Тамбов
mmm-tmb@rambler.ru

Аннотация. Рассмотрена конструкция и принцип действия устройства для дистанционного изменения объема измерительной емкости. Устройство реализовано с применением элементов промышленной пневмоавтоматики. Рассмотренное устройство может быть использовано в пневматических устройствах контроля при решении задач адаптации объемов измерительных емкостей к изменяющимся условиям проведения контроля.

Ключевые слова: измерительная емкость, пневмоавтоматика, дистанционное изменение объема.

Роль измерителей количества газа значительна. Они необходимы в приборах при проведении научных исследований, для управления технологическими процессами, определения скорости и количества выделяющихся газов и др. [1 – 5]. Одной из актуальных задач является обеспечение возможности дистанционного изменения условий проведения эксперимента, регулирования диапазона измерения.

Устройство (рис. 1) состоит из мерной емкости переменного объема, выполненной в виде цилиндра 1, разделенного на две полости 2 и 3 герметичной перемычкой, представляющей собой поршень 4, к центру которого и основанию 6 прикреплены концы пружины 7. Полость 2 мерной емкости соединена с входной камерой D_8 пятикратного элемента сравнения 8 (элемент УСЭПА типа П2ЭС.3-1) [6]. Полость 3 через штуцер 5 соединена с выходом элемента сравнения 8.

Камера B_8 элемента сравнения 8 соединена с выходом маломощного задатчика давления 9 (П2ЗД.3). Маломощный задатчик состоит из двух камер, отделенных друг от друга эластичной мембраной 10 с жестким центром 11, служащим заслонкой для сопла 12. Величина давления на выходе задатчика определяется степенью сжатия пружины 13. При подаче через постоянное пневматическое сопротивление 14 (П2.Д4) воздуха питания в камере 15 устанавливается давление, соответствующее сжатию пружины 13. Избыток сжатого воздуха через управляемое сопротивление, образованное соплом 12 и жестким центром 11, сбрасывается в атмосферу. Давление воздуха p_{15} в камере 15 является выходным сигналом p_9 задатчика 9, изменяющимся от степени сжатия пружины 13, измеряется манометром 16.

Состояние равновесия устройства характеризуется равенством сил

$$-F_{\text{пр}} + F_3 = F_2, \quad (3)$$

где F_2 – сила, действующая на поршень 4 со стороны полости 2; F_3 – сила, действующая на поршень 4 со стороны полости 3.

С учетом (1) и (2) из (3) получим

$$p_9 = \kappa_7 \Delta x_7 / S_4.$$

Учитывая, что $\Delta V_3 = \Delta x_7 S_4$ изменение объема полости 3 под действием совокупности сил, получим

$$\Delta V_3 = p_9 S_4^2 / k_7.$$

Так как $S_4^2 / k_7 = C$ – постоянная величина, определяемая параметрами конструкции, то $\Delta V_3 = C p_9$.

Изменяя задатчиком 9 давление p_9 , осуществляют изменение объема ΔV_3 полости 3 мерной емкости, при этом ΔV_3 пропорционально изменению объема ΔV_2 полости 2.

Рассмотренное выше устройство позволяет осуществлять подачу газа из мерной емкости по любому закону, формируемому задатчиком. Кроме того, применение мерной емкости в устройствах контроля, например скорости и объема выделяющихся газов, позволяет как дистанционно изменять частоту, так и осуществлять адаптацию к изменяющимся условиям проведения контроля.

Список литературы

1. Мордасов, Д. М. Физические основы пневмодинамического измерения пористости веществ / Д. М. Мордасов, М. М. Мордасов, Н. А. Булгаков // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2009. – Т. 15, № 3. – С. 661 – 666.
2. Мордасов, Д. М. Пневматическое времяимпульсное устройство для измерения плотности сыпучих материалов / Д. М. Мордасов, М. М. Мордасов, Н. А. Булгаков // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2000. – Т. 6, № 2. – С. 201 – 206.
3. Мордасов, Д. М. Пневмодинамический метод измерения удельного объема твердой фазы гетерогенных систем / Д. М. Мордасов, М. М. Мордасов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2002. – Т. 68, № 3. – С. 27 – 29.

4. Мордасов, Д. М. Бесконтактный аэрогидродинамический измерительный генератор / Д. М. Мордасов, М. М. Мордасов, А. П. Савенков // Приборы. – 2014. – № 8(170). – С. 10 – 14.
5. Мордасов, Д. М. Пневмодинамический числоимпульсный метод контроля плотности жидкостей / Д. М. Мордасов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2005. – Т. 11, № 2. – С. 363 – 367.
6. Мордасов, М. М. Технические средства пневмоавтоматики в устройствах контроля веществ / М. М. Мордасов, Д. М. Мордасов, А. В. Трофимов. – М.: Машиностроение, 2000. – 64 с.

MEASURING CAPACITY WITH REMOTE CHANGE OF VOLUME

M. M. Mordasov, M. D. Mordasov
Tambov State Technical University, Tambov
mmm-tmb@rambler.ru

Abstract. The article considers the design and operation principle of the device for remote change of the measuring capacitance volume. The device is implemented using elements of industrial pneumoautomatic equipment. The considered device can be used in pneumatic control devices when solving the problems of adapting the volumes of measuring tanks to the changing conditions for monitoring.

Keywords: measuring capacity, pneumoautomatic equipment, remote volume change.

АДАПТИВНЫЙ МИКРОВОЛНОВЫЙ МЕТОД И РЕАЛИЗУЮЩАЯ ЕГО СИСТЕМА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

А. П. Негуляева, С. А. Мордасов, В. Н. Чернышов

*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный
технический университет», Тамбов*

Аннотация. Обоснована актуальность создания новых адаптивных микроволновых методов и реализующих их измерительных систем неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов и изделий. Предложен микроволновый метод неразрушающего контроля теплофизических характеристик исследуемых объектов.

Ключевые слова: оперативность, СВЧ-излучение, температуропроводность, теплопроводность, тепловая активность.

В последнее время стали появляться и находить широкое применение методы контроля теплофизических характеристик строительных материалов, основанных на применении энергии СВЧ-излучения для нагрева исследуемых объектов [1, 2]. Это обусловлено тем, что такой вид теплового воздействия существенно повышает оперативность и точность методов и реализующих систем. В данной работе предлагается новый бесконтактный СВЧ-метод неразрушающего контроля материалов и изделий. Суть его состоит в следующем.

На поверхность исследуемого твердого строительного материала воздействуют импульсами СВЧ-излучения, сфокусированного в линию заданных размеров линзой из радиопрозрачного диэлектрического материала, осуществляя нагрев исследуемого полуграниченного в тепловом отношении тела. При этом неподвергаемая тепловому воздействию поверхность исследуемого объекта теплоизолирована от окружающей среды. Исследования показали, что с повышением частоты СВЧ-нагрева глубина проникновения электромагнитных волн уменьшается, а энергия СВЧ-излучения практически полностью выделяется на глубине не более 1...2 мм при частоте не менее 10 ГГц.

Вначале на поверхность исследуемого твердого материала воздействуют одиночным импульсом длительностью 2...3 с от генератора СВЧ-излучения с частотой не менее 20 ГГц мощностью Q по

линии заданных размеров, затем определяют время релаксации температурного поля от воздействия одного теплового импульса. Далее воздействуют на исследуемый объект импульсами СВЧ-излучения той же длительности, увеличивая частоту их подачи по заданному закону. Установившееся значение температуры в точке контроля достигается тогда, когда очередной тепловой импульс из серии импульсов, подаваемых источником, не изменяет температуру в этой точке. Определяют частоту тепловых импульсов F_{x_1} , затем продолжают увеличение частоты следования импульсов по указанной выше зависимости до тех пор, пока установившееся значение избыточной температуры в точке контроля x_2 станет равным наперед заданному значению $T_{\text{зад}2}$, и определяют соответствующую этому тепловому режиму частоту следования импульсов F_{x_2} . В работе [3] подробно приведен вывод математических соотношений для определения искоемых теплофизических характеристик (ТФХ). Они имеют следующий вид:

$$a = \frac{(x_2 F_{x_2})^2 \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{i^2} - (x_1 F_{x_1})^2 \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i^2}}{4 \left(F_{x_2} \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{i} - F_{x_1} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i} \right)}; \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{Q F_{x_1}}{2\pi T_{\text{зад}1}} \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{i} \exp\left(-\frac{x_1^2 F_{x_1}}{4ai}\right). \quad (2)$$

На рисунке 1 представлена блок-схема измерительной системы, реализующая предложенный адаптивный метод неразрушающего контроля ТФХ строительных материалов. Расстояние от рупорной антенны 2 и параметры используемой диэлектрической радиопрозрачной линзы 3 подобраны с целью минимизировать рассеивание электромагнитных волн в окружающую среду и возможностью собрать фокусируемое излучение в линию 4 заданных размеров. Нагрев исследуемого материала 5 осуществляется импульсами высокочастотного электромагнитного поля (СВЧ-излучение) длительностью 2...3 с от излучающей антенны 2, соединенной волноводом с СВЧ-генератором 1. После воздействия импульсом высокочастотного электромагнитного поля производят контроль избыточных температур на поверхности исследуемого материала.

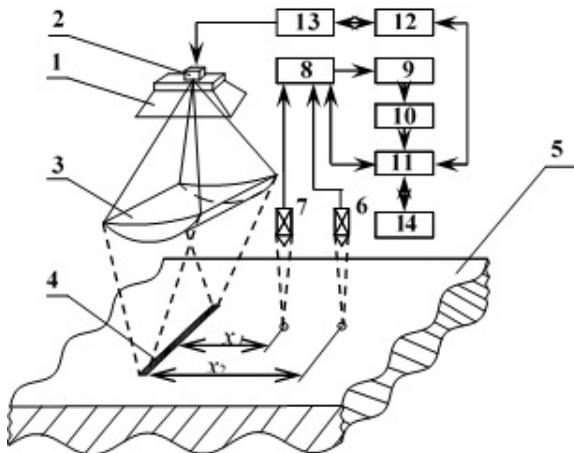


Рис. 1. Блок-схема микропроцессорной измерительной системы, реализующей микроволновый бесконтактный метод неразрушающего контроля ТФХ материалов

дуемого объекта в двух точках, находящихся на расстояниях x_1 и x_2 от линии воздействия, величину которых задают соответственно 5 и 10 мм. Контроль температуры осуществляют бесконтактными инфракрасными термопреобразователями 6 и 7, сфокусированными в точки поверхности на расстояниях x_1 и x_2 от линии теплового воздействия, которые через коммутатор 8, нормирующий прецизионный усилитель 9 и аналогово-цифровой преобразователь 10, подключают к микропроцессору 11. Микропроцессор 11 соединен с СВЧ-генератором через порт ввода-вывода 12 и цифроаналоговый преобразователь 13. Полученные данные эксперимента выводятся на индикатор 14.

Основным преимуществом предложенного метода и реализующей его системы по сравнению с известными являются нагрев исследуемых объектов без применения традиционных нагревательных элементов, что исключает погрешность от контактного термосопротивления между нагревателем и поверхностью исследуемого объекта, от влияния собственной теплоемкости металлического нагревателя на контролируемую термограмму нагрева и т.д. Кроме того, адаптивное изменение мощности теплового воздействия обеспечивает высокую точность температурно-временных изменений с гарантией сохранения целостности и эксплуатационных характеристик исследуемых объектов.

Список литературы

1. Чернышова, Т. И. Методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / Т. И. Чернышова, В. Н. Чернышов. – М.: Машиностроение, 2001. – 240 с.
2. Чернышова, Т. И. Методы и информационно-измерительные системы неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий / Т. И. Чернышова, В. Н. Чернышов. – СПб.: Экспертные решения, 2016. – 384 с.
3. Адаптивный метод неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий с применением энергии СВЧ-излучения для нагрева исследуемых объектов / В. Н. Чернышов, А. П. Негуляева, С. П. Москвитин, А. В. Чернышов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2018. – Т. 24, № 1. – С. 16 – 23.

ADAPTIVE MICROWAVE METHOD AND IMPLEMENTING ITS SYSTEM OF NON-DESTRUCTIVE TESTING OF THERMAL PROPERTIES OF MATERIALS AND PRODUCTS

A. P. Negulyaeva, S. A. Mordasov, V. N. Chernyshov
Tambov State Technical University, Tambov

Abstract. The relevance of creating new adaptive microwave methods for nondestructive testing of thermophysical characteristics of materials and products and measuring systems that realize them is substantiated. A microwave method for nondestructive testing of thermophysical characteristics of the investigated objects is proposed.

Keywords: operational efficiency, microwave radiation, thermal diffusivity, thermal conductivity, thermal activity.

**МЕТОДЫ ТЕОРИИ ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛОВ
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПСИХОФИЗИЧЕСКОМУ
ШКАЛИРОВАНИЮ**

**Нурзула Есимова¹, Е. Н. Мещерякова¹, Е. А. Асмолова¹,
О. А. Кувшинова²**

¹ФГБОУ ВО «ПензГТУ», Пенза

Vladimir_roganov@mail.ru

²ФГБОУ ВО «ПГУАС», Пенза

oly791702@rambler.ru

Аннотация. В статье рассматриваются некоторые подходы определения дифференциальных порогов и психофизической функции с использованием теории обнаружения сигнала.

Ключевые слова: дифференциальный порог обнаружения сигнала, психофизические функции.

В психофизических теориях после Г. Т. Фехнера по существу прекращено обсуждение активности сознания в процессе обнаружения сигнала [1]. Как правило, с момента их появления и до наших дней в теоретических и психофизических построениях преимущественно конструируются гипотетические физиологические механизмы, описывающие работу сенсорной системы [2], например, в современной психофизике [3]. Необходимость осознания поступившего сигнала в этих теориях не учитывается, но последовательно вводятся новые дополнительные несенсорные факторы.

Вместе с тем, принятие решения – необходимый этап в задаче выделения и обнаружения искомого сигнала. Поэтому необходимо разработать и применить новые подходы к построению психофизических функций, основанных на теории обнаружения сигнала, которые трактуются как выделение сигнала на фоне шума [4].

До настоящего момента в классических теориях, основанных на степенном и логарифмическом законе, существуют противоречивые точки восприятия сенсорных сигналов, и отсутствует общепринятый закон, описывающий реакцию сенсорной системы человека на стимулы [5]. Будем считать, что должна быть связь между объективными характеристиками и субъективно воспринимаемым качеством на примере цифровых фоторепродукций, исследуя печатные оттиски текстов.

Выделим задачи:

- 1) обработка ранее полученных экспериментальных данных;
- 2) расчет параметров функции плотности вероятности распределения субъективной оценки интенсивности стимулов;
- 3) определение пороговых разрешений.

При проведении исследований использовались методы, используемые при определении абсолютного порога, разработанные Густавом Теодором Фехнером (1801 – 1887) [1]. Для исключения необъективности и ошибок сейчас широко используют модификации метода границ, в частности *метод лестницы (staircase method)* (Cornsweet) [3]. Кроме этого, используется метод постоянных раздражителей для определения абсолютного порога.

Классическую психофизику называют *объективной*, однако современная психофизика в большей степени *субъективная*; так как решение принимает испытуемый. Кроме этого, современный вариант сенсорной психофизики (теории обнаружения сигналов) исходит из постулата о непрерывном (а не дискретном, пошаговом как у Фехнера) возрастании интенсивности ощущения наравне с возрастанием интенсивности стимула. При этом порог стал не точкой, а диапазоном: вместо понятия порога вводится модель сигнала на фоне шума [6]. Будем считать что нет такой условной точки на шкале раздражителей, которая разделяла бы отсутствие и наличие ощущения [7].

Для подтверждения разработанной гипотезы было проведено индивидуальное тестирование, сопоставление пар ахроматических оттисков и сопоставление пар хроматических оттисков соответственно по двум направлениям. Тест представлял собой сравнение пар изображений, отпечатанных на отдельных листах бумаги формата А4. В процессе прохождения теста испытуемый рассматривал каждую пару, сравнивая качество правого изображения с левым и оценивая его как «лучше», «хуже» или «одинаково».

Для определения возможных разрешений были выбраны три диапазона: 13...17, 24...39 и 44...153 точек/см.

В целях создания одинаковых условий прохождения тестирования всеми испытуемыми была создана экспериментальная установка в виде кабины. Освещение внутри соответствует условиям стандарта ISO 3664:2000 «Условия просмотра – полиграфия и фотография».

Для проведения исследования использовался тест, который представлял собой сравнение пар черно-белых и цветных изображений, отпечатанных на отдельных листах формата А4, а в процессе прохождения теста испытуемый рассматривал каждую пару, сравнивал качество правого изображения с левым. Девять вариантов возможности исходов представлены в табл. 1.

1. Исходы опыта и их вероятности

Сти- мул	От- вет	Событие		Вероятности событий
+	+	Hit	Попадание (Правильное обнаружение положительного сигнала) H^+	$H^+ = P(H^+) =$ $= \int f(R; \Delta R) 0; x) dx =$ $= 0,5 - \Phi\left(\frac{\psi^+ - a}{\sigma}\right)$
+	0	Omission ⁺	Пропуск положительного сигнала O^+	$o^+ = P(O^+) =$ $= \int_{\psi^-}^{\psi^+} f(R; \Delta R) 0; x) dx =$ $= \Phi\left(\frac{\psi^+ - a}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{\psi^- - a}{\sigma}\right)$
+	-	Inversion	Инверсия положительного сигнала (Супер Ложная Тревога) I^+	$i^+ = P(I^+) =$ $= \int_{-\infty}^{\psi^-} f(R; \Delta R) 0; x) dx$
0	+	False Alarm	Ложная тревога FA^+	$a^+ = P(FA^+) =$ $= \int_{\psi^+}^{+\infty} f(R; \Delta R) 0; x) dx$
0	0	Correct Rejection	Корректное отрицание сигнала. CR	$\gamma = P(CR) =$ $= \int_{\psi^-}^{\psi^+} f(R; \Delta R) 0; x) dx$
0	-	False Alarm	Ложная тревога FA^-	$a^- = P(FA^-) =$ $= \int_{-\infty}^{\psi^-} f(R; \Delta R) 0; x) dx$

Сти-мул	От-вет	Событие		Вероятности событий
-	+	Inversion	Инверсия отрицательного сигнала (Супер Ложная Тревога) I^-	$i^+ = P(I^-) =$ $= \int_{\psi^+}^{+\infty} f(R; \Delta R) 0; x dx$
-	0	Omission ⁻	Пропуск отрицательного сигнала O^-	$o^- = P(O^-) =$ $= \int_{\psi^+}^{\psi^-} f(R; \Delta R) 0; x dx$
-	-	Hit	Попадание (Правильное обнаружение отрицательного сигнала H)	$h^- = P(H^-) =$ $= \int_{-\infty}^{\psi^-} f(R; \Delta R) 0; x dx$

При проведении исследований положительные ответы («лучше») обозначаются символом «+», отрицательные – символом «-», а отсутствие разницы символом «=». Второй столбец – ответы, данные респондентом.

Результаты тестов обрабатывались для каждого из трех диапазонов разрешений: 13...17 точек/см, 24...39 точек/см и 44...153 точек/см. Числовые данные представлены в табл. 2.

2. Найденные ложные тревоги и верное отклонение

Диапазон разрешений, точек/см	Формат файла	P(FA+)	P(CR)	P(FA-)
13...17	color	0,19	0,57	0,24
	b/w	0,22	0,58	0,19
24...39	color	0,19	0,61	0,2
	b/w	0,19	0,57	0,24
44...153	color	0,24	0,63	0,13
	b/w	0,2	0,62	0,18

3. Абсолютный дифференциальный порог

Диапазоны разрешений точек/см	Тип изображений	Абсолютный дифф. порог точек/см	Абсолютный дифф. порог $d\rho_i$
13...17	Цветные	2,7	6,9
	Черно-белые	1,68	4,3
24...39	Цветные	8,4	21,3
	Черно-белые	2,62	6,7
44...153	Цветные	146,2	371,3
	Черно-белые	121,3	308,1

Полученная суммарная вероятность составляет около 0,4, что свидетельствует о склонности человека видеть разницу там, где ее нет. В точках пересечения с прямыми $y = 0,5$ аргументы функций образуют интервал значений, равный дифференциальному порогу. В таблице 3 представлены найденные значения дифференциальных порогов для каждого диапазона разрешений.

Выводы. В результате при исследовании подходов к построению психофизической функции на основе теории обнаружения сигнала было показано, что в рамках этого подхода могут быть определены дифференциальные пороги произвольной вероятности в отличие от традиционной вероятности 0,5.

Список литературы

1. Психофизика: законы Фехнера и Стивенса. Основные положения теории обнаружения сигнала. – URL: <http://shpargalki.ru/news/34.html> (дата обращения: 12.10.2014).
2. Developing the structure of the quality control system of power supply units in mobile robots: in 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), June 29–30, 2017, Astana, Kazakhstan / M. Yu. Mikheev, V. R. Roganov, P. G. Andreev, N. V. Goryachev, V. A. Trusov. – URL: <http://toc.proceedings.com/35400webtoc.pdf>
3. Шиффман, Х. Ощущение и восприятие / Х. Шиффман. – СПб.: Питер, 2003. – 928 с.
4. Описание биологической обратной связи с использованием элементов теории автоматического управления / Б. А. Истомина, С. А. Иванов, А. В. Герасименко, В. Р. Роганов, В. В. Истомина, Т. В. Истомина // Современные технологии и развитие политехнического образования. Научное электронное издание: сб. ст. – 2016. – С. 711 – 714.
5. Психофизика. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/psihofizika> (дата обращения: 18.10.2014).

6. Дифференциальный порог. – URL: <http://dic.academic.Ru/dic.Nsf/psihologic/563/> (дата обращения: 20.10.2014).

7. Problem of virtual space modelling in aviation simulators / V. R. Roganov, E. A. Asmolova, A. N. Seredkin, M. V. Chetvergova, N. B. Andreeva, V. O. Filippenko // in Life Science Journal. – 2014. – V. 11, N 12s. – 1097 P.

METHODS OF THE THEORY OF DETECTION OF SIGNALS APPLYING TO PSYCHOPHYSICAL CALCULATION

Nurzula Esimova¹, E. N. Meshcheryakova¹, E. A. Asmolova¹,
O. A. Kuvshinova²

¹Department “Information technology systems” PenzSTU,
Penza

Vladimir_roganov@mail.ru

²Department “Information-computing systems” FGBOU PGUAS,
Penza
oly791702@rambler.ru

Abstract. The article considers some approaches to determining differential thresholds and psychophysical functions using signal detection theory.

Keywords: differential threshold of signal detection, psychophysical functions.

References

1. Psychophysics: the laws of Fechner and Stevens. The main provisions of the theory of signal detection. – URL: <http://shpargalki.ru/news/34.html> (circulation date: 12.10.2014).

2. Developing the structure of the quality control system of power supply units in mobile robots: in 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), June 29–30, 2017, Astana, Kazakhstan / M. Yu. Mikheev, V. R. Roganov, P. G. Andreev, N. V. Goryachev, V. A. Trusov. – URL : <http://toc.proceedings.com/35400webtoc.pdf>

3. Shiffman, H. Sensation and perception / H. Shiffman. – St. Petersburg: Peter, 2003. – 928 p.

4. Description of the biological feedback using the elements of the theory of automatic control / B. A. Istomin, S. A. Ivanov, A. V. Gerasimenko, V. R. Roganov, V. V. Istomin, T. V. Istomina // In the collection: Modern technologies and the development of polytechnical education. Scientific electronic publication. 2016. – P. 711 – 714.

5. Psychophysics. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/psihofizika> (reference date: 18.10.2014).

6. Differential threshold. – URL: <http://dic.academic.Ru/dic.Nsf/psihologic/563/> (date of circulation: 20.10.2014).

7. Problem of virtual space modelling in aviation simulators / V. R. Roganov, E. A. Asmolova, A. N. Seredkin, M. V. Chetvergova, N. B. Andreeva, V. O. Filippenko // in Life Science Journal. – 2014. – V. 11, N 12s. – 1097 P.

**ЗАДАЧА РАЗРАБОТКИ
ОПТИКО-ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА
«ТРЕХМЕРНЫЙ МЕДИЦИНСКИЙ АТЛАС»**

**В. Р. Роганов¹, М. Ю. Михеев¹,
Э. В. Роганова², О. В. Гринцова², Ю. О. Лавендел³**

¹*ФГБОУ ВО «ПензГТУ», Пенза*

Vladimir_roganov@mail.ru

²*ФГБОУ ВО «ПИУАС», Пенза, Россия*

roganelka@mail.ru

³*Рижский государственный технический университет, Рига, Латвия*
juris.lavendels@rtu.lv

Аннотация. Последние достижения науки и техники позволяют создавать обучающие системы, ориентированные на привитие профессиональных навыков. Примером является трехмерный медицинский атлас.

Ключевые слова: медицинский атлас, 3D-индикатор, обучающие системы.

Исследования в области создания обучающих систем на основе использования возможностей вычислительной техники, начавшиеся при разработке в Рижском политехническом институте в 1980-е годы обучающей системы «Контакт» и продолжившиеся при создании авиационных тренажеров на пензенских предприятиях «Эра» и «ПКБМ» [1], позволили выделить основные направления создания обучающего комплекса «Трехмерный медицинский атлас» [2]. Такой комплекс должен быть реализован на стандартных аппаратно-программных системах с использованием как безочковых 3D-индикаторов [3, 4], так и систем с диспаратными очками (при отсутствии у обучаемого системы моделирования трехмерного изображения, ему предоставляется возможность работать с двухмерными проекциями исследуемых органов [5]). Особенностью разработанного трехмерного медицинского комплекса, кроме предоставления обучаемому визуально исследовать и изучать органы человека, является не доступная ранее мультимедийность [6] (предоставление текстовой и аудиоинформации на разных языках [7]), что обусловлено новыми возможностями хранения в «облаке» значительного объема информации и достаточно быстрого ее извлечения по запросам [8].

Исследования показали, что Трехмерный медицинский атлас должен:

– воспроизводить модели человеческого тела, полученные путем видеосъемки реальных патологоанатомических препаратов,

в том числе с наиболее часто встречающейся патологией, а также 3D-модели, полученные с использованием методов машинной графики [9] (например, привязанную к рассматриваемому органу сеть кровеносных сосудов) с учетом топографо-анатомической связи органов [10];

- воспроизводить модели с наиболее часто встречающейся патологией;

- воспроизводить модели, разработанные с использованием данных компьютерной томографии и трехмерного сканирования органов;

- учитывать топографо-анатомические связи органов, информация о которых имеется в постоянно пополняющемся «Мультиязычном трехмерном медицинском атласе»;

- быть ориентированным на кроссплатформенность (возможность работы с различными операционными системами фирмы Microsoft и свободно распространяемыми операционными системами);

- все проведенные работы должны реализовывать принцип «открытой системы», что предполагает возможность пополнения базы данных с информацией об объектах человеческого тела;

- ориентироваться на использование как систем моделирования объемного изображения (созданных на базе диспаратных очков, или на базе безочковых коллиматорных систем), так и на использование обычных мониторов персональных компьютеров;

- объявленная мультиязычность предполагает наличие информационных материалов, как минимум, на четырех языках: русском, латинском, английском, немецком;

- универсальность комплекса предполагает его использование как в режиме справочника, так и в режиме «учителя», отличающегося тем, что демонстрация материалов сопровождается соответствующим голосовым сообщением [11];

- интеллектуальность, заключающаяся в возможности быстрого поиска материалов на основании текстовых запросов на естественном языке [12].

Выводы. Опытная эксплуатация оптико-программно-аппаратного комплекса «Трехмерный медицинский атлас», появившегося как дальнейшее развитие обучающей систем «Контакт» и авиационных тренажеров, показал что в соответствии с выдвинутым в 1970-годы академиком В. Глушковым «принципом новых задач», наиболее удачным вариантом надо считать создание модульного комплекса, позволяющего обучаемому, имеющему безочковые 3D-индикаторы типа ОКУ или РЭЛЛИ, или двухканальные системы с диспаратными очками, рас-

сма­тривать трехмерную визуаль­но наблюдаемую модель, позволяющую врачу приобретать профессиональные навыки, связанные с диагно­стированием по визуаль­но наблюдаемому изображению, или рас­сма­тривая 2D-проекцию трехмерного органа полу­чать первичные на­выки диагно­стирования. Это же относится к возможности получения необходимой текстовой и аудиоинформации. Модернизация такого комплекса заключается в его доукомплектовании соответствующими индикаторными системами.

Список литературы

1. Роганов, В. Р. Комплексная организация системы формирования ин­формационного обеспечения авиационного тренажера / В. Р. Роганов // Современ­ные информационные технологии. – 2017. – № 26(26). – С. 57 – 66.
2. Семочкин, А. В. Определение требований к системе подготовки и ви­зуализации 3D-моделей для оптико-аппаратно-программного комплекса «Трехмерный медицинский атлас» / А. В. Семочкин, В. Р. Роганов // Теория и практика имитационного моделирования и создания тренажеров: сборник. – Пенза, 2015. – С. 38 – 43.
3. Патент на изобретение RUS 2146856 . Система объемного телевидения / Роганов В. Р. – 30.12.1997.
4. Патент на изобретение RUS 2337606 . Оптическая система эндоскопа / Роганова Э. В. – 09.07.2007.
5. Роганов, В. Р. Анализ современного состояния исследований и разработок визуальных баз данных компьютерных генераторов изображений имитаторов визуальной обстановки авиационных тренажеров / В. Р. Роганов // Современные информационные технологии. – 2017. – № 26(26). – С. 45 – 57.
6. Середкин, А. Н. Основы защиты информации и информационные технологии: учебное пособие. – В 3-х ч. Кн. 1. Основные определения и общие вопросы защиты информации / А. Н. Середкин, В. Р. Роганов, В. О. Филиппенко; под ред. А. Н. Середкина. – Пенза, 2013. – 344 с.
7. Гришина, Ю. В. Задача разработки сайта пензенского общества охотников и рыболовов / Ю. В. Гришина, В. Р. Роганов // Актуальные вопросы современной науки: теория и практика научных исследований: сб. науч. тр. всерос. науч.-практ. конф. – 2017. – С. 24 – 27.
8. Описание биологической обратной связи с использованием элементов теории автоматического управления. Научное электронное издание / Б. А. Истомин, С. А. Иванов, А. В. Герасименко, В. Р. Роганов, В. В. Истомин, Т. В. Истомина // Современные технологии и развитие политехнического образования: сборник. – 2016. – С. 711 – 714.
9. Роганов, В. Р. Эффективность алгоритмов удаления невидимых примитивов и их частей при синтезе изображения методами машинной графики / В. Р. Роганов // Актуальные вопросы современной науки: теория и практика научных исследований: сб. науч. тр. Всерос. науч.-практ. конф. – 2017. – С. 69 – 71.

10. К вопросу о возможности использования отдельных имитаторов в оптико-программно-техническом комплексе авиационного тренажера / В. О. Филиппенко, А. В. Семочкин, Е. А. Асмолова, А. М. Михеев // Надежность и качество: тр. Международного симпозиума. – 2015. – Т. 1. – С. 198 – 200.

11. Developing the structure of the quality control system of power supply units in mobile robots / M. Y. Mikheev, V. R. Roganov, P. G. Andreev, N. V. Goryachev, V. A. Trusov // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications: sb. st. SIBCON 2017 – Proceedings 2017. – P. 799 – 857.

12. Обработка информации в системе идентификации по термограмме лица / М. Ю. Михеев, К. В. Гудков, Т. Н. Астахова, Е. Ю. Макарова // Вестник НГИЭИ. – 2017. – № 4(71). – С. 7 – 15.

THE PROBLEM OF DEVELOPMENT OF OPTICALLY-SOFTWARE-EQUIPMENT COMPLEX “THREE-DIMENSIONAL MEDICAL ATLAS”

**V. R. Roganov¹, M. Yu. Mikheev¹,
E. V. Roganova², O. V. Grincova², Yu. O. Lavendel³**

*¹Department “Information technology systems”, FGBOU VO “PenzSTU”,
Penza*

Vladimir_roganov@mail.ru

*²Department “Information-computing systems” FGBOU IN PGUAS, Penza,
roganelka@mail.ru*

*³Riga State Technical University, Riga, Latvia
jurijs.lavendels@rtu.lv*

Abstract. The latest achievements of science and technology make it possible to create training systems that are oriented towards the inculcation of professional skills. An example is a three-dimensional medical atlas.

Keywords: medical atlas, 3D-indicator, training systems.

References

1. Roganov, V. R. The complex organization of the system for the formation of the information support of an airplane simulator / V. R. Roganov // Modern Information Technologies. – 2017. – N 26(26). – P. 57 – 66.

2. Semochkin, A. V. Definition of the requirements for the system of preparation and visualization of 3D-models for the optical-hardware-software complex “Three-dimensional medical atlas” / A. V. Semochkin, V. R. Roganov // In the collection: Theory and practice of simulation modeling and creation of simulators. – Penza, 2015. – P. 38 – 43.

3. Patent for invention RUS 2146856 . Volumetric television system / Roganov V. R. – 30.12.1997.

4. Patent for invention RUS 2337606 . Optical system of the endoscope / Roganova E. V. – 09.07.2007.
5. Roganov, V. R. Analysis of the current state of research and development of visual databases of computer image generators of visual simulators of aviation simulators / V. R. Roganov // *Modern Information Technologies*. – 2017. – N 26(26). – P. 45 – 57.
6. Seryodkin, A. N. Fundamentals of Information Security and Information Technology. Textbook in 3 parts. Tom. 1. Basic definitions and general issues of information protection / A. N. Seryodkin, V. R. Roganov, V. O. Filippenko; Ed. A. N. Seryodkina. – Penza, 2013. – 344 p.
7. Grishina, Yu. V. The task of developing the site of the Penza society of hunters and fishermen / Yu. V. Grishina, V. R. Roganov // *Actual problems of modern science: theory and practice of scientific research: collection of scientific works of the all-Russian scientific and practical conference*. – 2017. – P. 24 – 27.
8. Description of the biological feedback using the elements of the theory of automatic control / B. A. Istomin, S. A. Ivanov, A. V. Gerasimenko, V. R. Roganov, V. V. Istomin, T. V. Istomina // *In the collection: Modern technologies and the development of polytechnical education. Scientific electronic publication*. – 2016. – P. 711 – 714.
9. Roganov V. R. Efficiency of algorithms for removing invisible primitives and their parts in the synthesis of images using computer graphics / V. R. Roganov // *Actual problems of modern science: theory and practice of scientific research: collection of scientific works of the all-Russian scientific and practical conference*. – 2017. – P. 69 – 71.
10. On the possibility of using individual simulators in the optical-software and technical complex of an airplane simulator / V. O. Filippenko, A. V. Semochkin, E. A. Asmolova, A. M. Mikheev // *Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. – 2015. – V. 1. – P. 198 – 200.
11. Developing the structure of the quality control system of power supply units in mobile robots / M. Y. Mikheev, V. R. Roganov, P. G. Andreev, N. V. Goryachev, V. A. Trusov // *2017 International Siberian Conference on Control and Communications: sb. st. SIBCON 2017 – Proceedings 2017*. – P. 799 – 857.
12. Information processing in the identification system according to the person's thermogram / M. Yu. Mikheev, K. V. Gudkov, T. N. Astakhova, E. Yu. Makarova // *Vestnik NGER*. – 2017. – N 4(71). – P. 7 – 15.

К ВОПРОСУ О РАСЧЕТЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ АКТИВНОГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ

В. Р. Роганов¹, Э. В. Роганова¹, А. В. Герасименко²

¹ФГБОУ ВО ПензГТУ, Пенза

Vladimir_roganov@mail.ru

roganelka@mail.ru

²ФГБОУ ВО ДФУ, Владивосток

andrey.v.gerasimenko@yandex.ru

Аннотация. Для повышения показателей работоспособности на особо важных объектах принято проводить мероприятия по активному резервированию. В частности, используют системы мажоритарного контроля. Вместе с тем, вопрос о методах расчета показателей надежности остается открытым. Как правило, ограничиваются рассуждениями о том, насколько лучше должна работать система с мажоритарным контролем. Считаем, что вопрос о расчете показателей надежности надо решать более комплексно.

Ключевые слова: энергообъекты, теория надежности, системы релейной защиты.

В теории надежности один из методов повышения работоспособности – горячее резервирование. Основатель Рижской школы релейной защиты – В. Л. Фабрикант, рассматривая изменение вероятностей безотказной и ошибочной работы систем из устройств релейной защиты (Срз), предложил гипотезу расчета состояний, в которых может находиться как РЗ, так и Срз [1]. По этой гипотезе число возможных состояний РЗ оценивается как работоспособность P_P и отказ P_O . Соответственно P – полная вероятность одной РЗ будет

$$P = P_P + P_O, \quad (1)$$

а P_C – полная вероятность Срз будет

$$P_C = P_{C_P} + P_{C_O}. \quad (2)$$

Им было предложено, при объединении двух УРЗ

$$P_C = (P_P + P_O)^2 = P_P^2 + 2P_PP_O + P_O^2. \quad (3)$$

Из (3) следует, что

$$P_{P_C} = P_P^2, \quad (4)$$

$$P_{O_C} = 2P_P P_O + P_O^2. \quad (5)$$

Тогда всегда

$$P_{P_C} < P_P, \quad (6)$$

что не имеет смысла, и поэтому в этом направлении не стоит двигаться.

Однако проведенные эксперименты [2] показывают, что это не всегда так, иногда:

$$P_{P_C} > P_P. \quad (7)$$

В том числе [3], когда для повышения работоспособности используют систему с мажоритарным элементом (МЭ).

Изменим гипотезу, разделив вероятность ошибочной работы как УРЗ, так и СРЗ, на две вероятности по последствиям ошибочной работы для энергосистемы [2]. Для одного УРЗ введем два ошибочных состояния: несрабатывание – P_H и ложное срабатывание P_L . При рассмотрении СРЗ, соответственно, безотказная работа P_{P_C} , несрабатывание P_{H_C} и ложное срабатывание P_{L_C} . Тогда (3) преобразуется как

$$P_C = P_P + P_H + P_L. \quad (8)$$

При объединении двух УРЗ в любую из систем, (3) преобразуется как

$$P_C = (P_P + P_H + P_L)^2 = P_P^2 + P_H^2 + P_L^2 + 2P_P P_H + 2P_P P_L + 2P_H P_L. \quad (9)$$

Выделим из многочлена, описывающего полную вероятность нахождения СРЗ в возможных состояний, вероятности, описывающие возможность нахождения СРЗ в каждом из трех состояний: работоспособность, несрабатывание и ложное срабатывание. Для СРЗ, созданной с помощью схемы «И»,

$$P_{P_C} = P_P^2 + 2P_P P_L, \quad (10)$$

$$P_{H_C} = P_H^2 + 2P_P P_H + 2P_H P_L, \quad (11)$$

$$P_{L_C} = P_L^2. \quad (12)$$

Для СРЗ, созданной с помощью схемы «ИЛИ»,

$$P_{PC} = P_P^2 + 2P_P P_H, \quad (13)$$

$$P_{HC} = P_H^2, \quad (14)$$

$$P_{LC} = P_L^2 + 2P_P P_L + 2P_H P_L. \quad (15)$$

Вычислив возможные значения

$$\Delta P_{PC} = P_{PC} - P_P, \quad (16)$$

$$\Delta P_{HC} = P_{HC} - P_H, \quad (17)$$

$$\Delta P_{LC} = P_{LC} - P_L, \quad (18)$$

получаем, что при использовании СРС со схемой «И» в ряде случаев имеем положительное ΔP_{PC} . Аналогичные результаты можно получить и при использовании СРС со схемой «ИЛИ», но при других значениях P_P, P_H, P_L .

Выводы. Если в соответствии с новой гипотезой рассчитать вероятности, описывающие систему из трех УРЗ как со схемой «И», так и со схемой «ИЛИ», или схемы с мажоритарным элементом, то получим, что все эти решения, как и решения с объединением большего числа элементов, *не эффективны.*

Список литературы

1. Фабрикант, В. Л. О применении теории надежности к оценке устройств релейной защиты / В. Л. Фабрикант // Электричество. – 1965. – № 9. – С. 36 – 44.
2. Гемст, В. К. Синтез микропроцессорных систем локальной автоматизации с устройством функционального контроля / В. К. Гемст, В. Р. Роганов // Микропроцессорные системы контроля и управления : сб. науч. тр. – Рига: Рижск. политехн. ин-т, 1984. – С. 22 – 29.
3. Базовский, И. Надежность / И. Базовский. – М. : Мир, 1965. – 374 с.

ON THE CALCULATION OF RELIABILITY INDICATORS FOR ACTIVE REDUNDANCY SYSTEMS

V. R. Roganov¹, E. V. Roganova¹, A. V. Gerasimenko²

¹*FGBOU VO PenzSTU, Penza*

Vladimir_roganov@mail.ru

roganelka@mail.ru

²*FGBOU DFU, Vladivostok*

andrey.v.gerasimenko@yandex.ru

Abstract. To improve performance at critical sites, it is customary to carry out activities for active backup. In particular, they use systems of majority control at large power facilities. At the same time, the question of methods for calculating reliability indicators remains open. As a rule, they limit themselves to reasoning about how much better the system with majority control should work. We believe that the question of calculating reliability indicators should be solved more comprehensively.

Keywords: power objects, reliability theory, relay protection systems.

References

1. Fabrikant, V. L. On the application of reliability theory to the evaluation of relay protection devices / V. L. Fabrikant // *Electricity*. – 1965. – N 9. – P. 36 – 44.
2. Gemst, V. K. Synthesis of microprocessor systems of local automation with the device of functional control / V. K. Gemst, V. R. Roganov // *Microprocessor control and control systems: sb.* – Riga: Riga. Polytechnics. in-t, 1984. – P. 22 – 29.
3. Bazovsky, I. *Reliability* / I. Bazovsky. – M.: The World, 1965. – 374 p.

СРЕДНИЕ РЯДОВ ФУРЬЕ КАК МОДЕЛЬ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Ю. В. Родионов, Д. В. Никитин, А. Д. Нахман
*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный
технический университет», Тамбов*

Аннотация. Универсальная математическая модель процессов тепломассообмена представлена семейством экспоненциальных средних ряда Фурье периодической функции. Установлена сходимость средних в каждой точке Лебега (в частности, в точках непрерывности). Экспоненциальные средние применены к исследованию процесса сушки растительного сырья. Адекватность модели подтверждена результатами эксперимента по конвективной сушке плодов боярышника.

Ключевые слова: экспоненциальные средние, задача тепломассообмена, конвективная сушка плодов боярышника.

1. Экспоненциальные средние. В работах [1], [2] изучены экспоненциальные средние рядов Фурье:

$$U(f) = U(f, x; \alpha; t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \exp(-t |k|^\alpha) c_k(f) \exp(ikx), \quad t > 0, \quad \alpha > 0 \quad (1)$$

2π -периодических и интегрируемых по Лебегу на $(-\pi, \pi]$ функций $f = f(x)$; здесь $\{c_k(f)\}$ – последовательность комплексных коэффициентов Фурье

$$c_k(f) = \frac{2}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\tau) \exp(-ik\tau) d\tau, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

функции f . Семейство средних (1) имеет многочисленные применения в теории функций действительного переменного (вопросы интегрируемости преобразований Фурье, абсолютной сходимости рядов Фурье, представление Дирихле полугруппы операторов, коммутирующих со сдвигами и др. [1, 2]). Кроме того, при подходящем варьировании параметра α данное семейство порождает универсальную математическую модель процессов тепломассообмена. Речь идет о процессе $U(f)$, в общем случае определяемого уравнением $(DU)(x, t) = 0$, где DU – некоторый дифференциальный оператор, x и t – параметры процесса (например, t – время, прошедшее с начала

процесса); при этом заданы некоторые граничные и начальные условия протекания процесса. Так, например, возможен случай, когда DU есть оператор Лапласа или оператор дробного дифференцирования [1].

2. Моделирование процессов сушки. Одним из примеров применения семейства (1) к решению задач теплофизики является математическая модель процесса сушки растительного сырья [3].

В процессе сушки интерес представляет распределение температуры $U(x; t)$ внутри материала. Если на внешних поверхностях подерживается одинаковая постоянная температура U_0 , а начальная температура материала $f(x) = C_0$, $C_0 < U_0$, то имеем задачу

$$\frac{\partial V}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 V}{\partial x^2}; \quad V(0, t) = V(\pi, t) = 0; \quad V(x, 0) = C_0 - U_0,$$

где $V(x, t) = U(x, t) - U_0$. Температура в каждой точке x в каждый момент времени t тогда определится в виде [4, с. 90 – 94]

$$U(x; t) = U_0 + \frac{4(C_0 - U_0)}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \exp(-ta^2(2n-1)^2) \frac{\sin(2n-1)x}{2n-1}. \quad (2)$$

Близкая (с точки зрения возможностей использования универсальной модели (1)) задача – математическое моделирование процесса экстрагирования посредством вакуум-выпарной экстракционной установки.

3. Теорема сходимости. Формальная подстановка $t=0$ в (1) приводит к рассмотрению ряда Фурье, который в общем случае может быть расходящимся (расходимость в конкретных точках или даже всюду). В этой связи следует уточнить, каким образом будем понимать условие $U(f, x; \alpha; 0) = f(x)$, и, в частности, задание значения $V(x, 0)$. Наиболее естественным здесь является рассмотрение в качестве $U(f, x; \alpha; 0)$ предела вида $\lim_{t \rightarrow +0} U(f, x; \alpha; t)$.

Теорема. Соотношение

$$\lim_{t \rightarrow +0} U(f, x; \alpha; t) = f(x) \quad (3)$$

справедливо в каждой точке Лебега функции f при всех $\alpha > 0$. В частности, соотношение (3) имеет место в каждой точке непрерывности x функции f и равномерно по x для всякой непрерывной 2π -периодической $f(x)$.

4. Экспериментальное подтверждение адекватности модели.

В качестве объекта сушки были взяты плоды боярышника. Использовалась конвективная сушилка, процесс исследовался при следующих технологических параметрах: температура теплоносителя – 55 °С и скорость потока теплоносителя – 2 м/с. Температура теплоносителя определялась щадящими режимами (при которых сохраняются нативные характеристики исследуемого сырья), а скорость теплоносителя ограничивалась уносом сырья. Сушильным агентом в конвективной сушилке служил атмосферный воздух, нагреваемый при помощи ТЭНов, температура воздушного потока измерялась ХК-термопарой, скорость потока определялась при помощи ручного анемометра.

Построенные на основе модели (2) и полученные нами экспериментально кривые температур отличаются незначительно. Их анализ позволяет утверждать, что в любой момент времени внутри плодов боярышника наблюдается температурный градиент. Период прогрева плодов боярышника характеризуется резким скачком температуры за несколько минут. Затем линия приближается к своему асимптотическому пределу (температуре теплоносителя) и в дальнейшем температура плодов боярышника и теплоносителя становятся практически одинаковыми.

В общем случае изменение температуры плодов боярышника во время конвективной сушки представляет собой процесс, характеризуемый двумя периодами:

- 1) линейный прогрев – скачкообразным ростом температуры внутри сырья;
- 2) асимптотический предел – совпадение температур сырья и теплоносителя.

Таким образом, информация, получаемая на основе интерпретации модели в виде экспоненциальных средних (температурное поле, тенденции процесса и т.п.), подтверждена результатами описанного эксперимента.

Список литературы

1. Nakhman, A. D. Semigroups of bounded transforms of weighted Lebesgue spaces / A. D. Nakhman, B. P. Osilenker // International Journal of Applied and Fundamental Research. – 2016. – N 5. – URL: www.science-sd.com/467-25072 (17.08.2018).
2. Тригуб, Р. М. Суммируемость тригонометрических рядов Фурье в d -точках и обобщение метода Абеля–Пуассона / Р. М. Тригуб // Изв. РАН. Сер. матем. – 2015. – Т. 79, № 4. – С. 205 – 224.
3. Математическое моделирование комбинированной конвективной вакуум-импульсной сушки растительных продуктов / И. В. Попова и др. //

Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. – 2008. – № 1. – С. 60 – 65.

4. Куликов, Г. М. Метод Фурье в уравнениях математической физики / Г. М. Куликов, А. Д. Нахман. – М.: Машиностроение, 2000. – 156 с.

MEANS OF FOURIER SERIES AS A MODEL OF THERMOPHYSICAL PROCESS

Yu. V. Rodionov, D. V. Nikitin, A. D. Nakhman
Tambov State Technical University, Tambov

Abstract. A universal mathematical model of heat and mass transfer processes is represented by a family of exponential means of the Fourier series of a periodic function. The convergence of means is established at each of Lebesgue points (in particular, at points of continuity). Exponential means are applied to the study of the drying process of plant material. The adequacy of the model is confirmed by the results of the experiment on the convective drying of hawthorn fruits.

Keywords: exponential means, the problem of heat and mass transfer, convective drying of hawthorn fruits.

**ВКЛАД ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ
ОПТИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА ПОГЛОЩЕНИЯ
НА ПАРАМЕТРЫ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ НЕЛИНЕЙНОГО
ФОТОАКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА В ОПТИЧЕСКИ
НЕОДНОРОДНЫХ ДВУХСЛОЙНЫХ СИСТЕМАХ**

Т. Х. Салихов, А. Махмалатиф

Научно-исследовательский институт

Таджикского национального университета, Душанбе, Таджикистан

Аннотация. Предложена теория генерации второй гармоники (ВГ) нелинейного ФА-сигнала в оптически неоднородных двухслойных образцах. Для наиболее интересных случаев установлены зависимости амплитуд и фазы этого сигнала от частоты модуляции падающего луча и термических коэффициентов (ТК) теплофизических и оптических параметров, включая оптический коэффициент поглощения.

Ключевые слова: фотоакустика, тепловая нелинейность, двухслойные системы, нелинейный фотоакустический отклик, вторая гармоника, оптическая неоднородность.

Целью настоящей работы является установление вклада температурной зависимости величины $\beta_i(t, x) = \beta_i(T_i(t, x))$ – оптического коэффициента поглощения оптически неоднородных двухслойных систем на параметры второй гармоники (ВГ) нелинейного ФА-сигнала. Мы исходили из следующей системы нелинейных уравнений теплопроводности для всех четырех слоев (буферного газа, первых и вторых слоев образца и подложки) ФА-камеры:

$$C_{pg}(T_g) \frac{\partial T_g}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa_g(T_g) \frac{\partial T_g}{\partial x} \right), \quad 0 \leq x \leq l_g, \quad (1)$$

$$C_{PS(1)} \frac{\partial T'_{S(1)}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k_{S(1)}(T) \frac{\partial T'_{S(1)}}{\partial x} \right] +$$

$$+ 0,5 I_0 A_{S(1)}(T) (1 + e^{i\omega t}) \frac{\partial}{\partial x} e^{\int_0^x \beta_1(t,y) dy},$$

$$-l_{S(1)} \leq x \leq 0, \quad (2)$$

$$C_{pS(2)} \frac{\partial T'_{S(2)}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k_{S(2)}(T) \frac{\partial T'_{S(2)}}{\partial x} \right] +$$

$$+ 0,5 I_0 A_{S(2)}(T) (1 - R_{S(1)}(T)) (1 + e^{i\omega t}) e^{\int_0^{-\partial_1} \beta_1(t,x) dx} \frac{\partial}{\partial x} e^{-\int_0^x \beta_2(t,y) dy},$$

$$-(l_{S(1)} + l_{S(1)}) \leq x \leq -l_{S(1)}, \quad (3)$$

$$C_{pb}(T_b) \frac{\partial T_b}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa_b(T_b) \frac{\partial T_b}{\partial x} \right), \quad -(l_b + l_{S(1)} + l_{S(2)}) \leq x \leq -l_{S(1)} - l_{S(2)}, \quad (4)$$

где $C_{pi}(T_i)$ – теплоемкость единицы объема, $\kappa_{pi}(T_i)$ – теплопроводность, $A_{S(i)}(T)$ – поглощательная способность и $R_{S(i)}(T)$ – коэффициент отражения соответствующих слоев; I_0 – интенсивность падающего луча, а ω – ее частота модуляции. Температурную зависимость величин $C_{pi}(T)$, $\kappa_i(T)$, $A_{S(i)}(T)$ и $\beta_i(T)$ представим в виде

$$C_{pi} = C_{pi}^{(0)} (1 + \delta_i T'_i), \quad \kappa_i = \kappa_i^{(0)} (1 + \delta_{2i} T'_i), \quad A_{S(i)}(T) = A_{S(i)}^{(0)} (1 + \delta_{3S(i)} T'_i),$$

$$(1 - R_{1S(1)}) = (1 - R_{1S(1)})^{(0)} (1 + \delta_{4(1)} T'_{S(1)}(0, t)),$$

$$\beta_i(T_i(t, x)) = \beta_i^{(0)} [1 + \delta_{5(i)} T'_i(t, x)],$$

где $C_{pi}^{(0)} = C_{pi}(T_0)$, $\kappa_i^{(0)} = \kappa(T_0)$, $A^{(0)} = A(T_0)$, $\beta_i^{(0)} = \beta(T_0)$ – начальные значения, а $\delta_i = (1/C_{pi}^{(0)}) (\partial C_{pi} / \partial T)$, $\delta_{1i} = (1/c_{pi}^{(0)}) (\partial c_{pi}^{(0)} / \partial T)$, $\delta_{2i} = (1/\kappa_{2i}^{(0)}) (\partial \kappa_i / \partial T)$, $\delta_3 = (1/A^{(0)}) (\partial A / \partial T)$, $\delta_4 = (1/(1 - R_{1S(1)})^{(0)}) \times (\partial(1 - R_{1S(1)}) / \partial T)$, $\delta_{5(i)} = (1/\beta_i^{(0)}) (\partial \beta_i / \partial T)$ – термические коэффициенты этих параметров, $\delta_i = \delta_{1i} - \alpha_{Ti}$, $\alpha_{Ti} = -(1/\rho_{0i}) (\partial \rho_i / \partial T)_p$ – коэффициент теплового расширения, $c_{pi}^{(0)}$ – удельная теплоемкость соответствующего слоя.

Подставляя выражения $\beta_i(T_i(t, x)) = \beta_i^{(0)} [1 + \delta_{5(i)} T'_i(t, x)]$ в правые части уравнений (2) и (3) и, выполнив соответствующие разложения, будем иметь

$$C_{PS(1)} \frac{\partial T'_{S(1)}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k_{S(1)}(T) \frac{\partial T'_{S(1)}}{\partial x} \right] +$$

$$+ 0,5 I_0 A_{S(1)}(T) (1 + e^{i\omega t}) \frac{\partial}{\partial x} e^{\beta_1^{(0)} x} \left[1 + \beta_1^{(0)} \delta_{5S(1)} \int_0^x T_{S(1)}(t, y) dy \right],$$

$$-l_{S(1)} \leq x \leq 0, \quad (5)$$

$$C_{PS(2)} \frac{\partial T'_{S(2)}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k_{S(2)}(T) \frac{\partial T'_{S(2)}}{\partial x} \right] + 0,5 I_0 A_{S(2)}(T) (1 - R_{S(1)}(T)) (1 + e^{i\omega t}) e^{-\beta_1^{(0)} l_1} \times$$

$$\times \left[1 + \beta_1^{(0)} \delta_{5S(1)} \int_0^{-l_1} T_{S(1)}(t, y) dy \right] \frac{\partial}{\partial x} e^{\beta_1^{(0)}(x+l_1)} \left[1 + \beta_2^{(0)} \delta_{5S(2)} \int_{-l_1}^x T_{S(2)}(t, y) dy \right],$$

$$-(l_{S(1)} + l_{S(1)}) \leq x \leq -l_{S(1)}. \quad (6)$$

Из (1) и (4) – (6), пренебрегая величинами высших порядков малости, для второй гармоники $\Phi_{2Ni}(t, x)$ нелинейной составляющей акустического колебания температуры для всех слоев ФА-камеры получим следующую систему уравнений:

$$\frac{\partial^2 \Phi_{2Ng}}{\partial x^2} - \frac{1}{\chi_g^{(0)}} \frac{\partial \Phi_{2Ng}}{\partial t} = -\frac{1}{2} \left(\delta_{2g} \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\delta_g}{\chi_g^{(0)}} \frac{\partial}{\partial t} \right) [\Phi_{Lg}^2(t, x)], \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 \Phi_{2NS(1)}}{\partial x^2} = \frac{1}{\chi_{1S(1)}^{(0)}} \frac{\partial \Phi_{2NS(1)}}{\partial t} - 0,5 \left(\delta_{2S(1)} \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\delta_{1S(1)}}{\chi_{1S(1)}^{(0)}} \frac{\partial}{\partial t} \right) \Phi_{LS(1)}^2(x, t) -$$

$$- \frac{I_0 A_{S(1)}^{(0)} \beta_1^{(0)} e^{\beta_1^{(0)} x}}{2k_{S(1)}^{(0)}} \left\{ \delta_{3(1)} \Phi_{LS(1)}(0, t) + \delta_{5(1)} \left[\Phi_{LS(1)}(x, t) + \beta_1^{(0)} \int_0^x \Phi_{LS(1)}(y, t) dy \right] \right\}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 \Phi_{2NS(2)}}{\partial x^2} = \frac{1}{\chi_{1S(2)}^{(0)}} \frac{\partial \Phi_{2NS(2)}}{\partial t} - 0,5 \left(\delta_{2S(2)} \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\delta_{1S(2)}}{\chi_{1S(2)}^{(0)}} \frac{\partial}{\partial t} \right) \Phi_{LS(2)}^2(x, t) -$$

$$- \frac{I_0 A_{S(2)}^{(0)} (1 - R_{S(1)})^{(0)} \beta_2^{(0)} e^{\beta_2^{(0)}(x+l_1)}}{2k_{S(1)}^{(0)}} e^{i\omega t} \left\{ \delta_{3(1)} \Phi_{LS(2)}(0, t) + \right.$$

$$\left. + \delta_{5(2)} \left[\Phi_{LS(2)}(x, t) + \beta_2^{(0)} \int_{-l_1}^x \Phi_{LS(2)}(y, t) dy \right] + \beta_1^{(0)} \delta_{5(2)} \int_0^{-l_1} \Phi_{LS(1)}(y, t) dy \right\}, \quad (9)$$

$$\frac{\partial^2 \Phi_{2Nb}}{\partial x^2} - \frac{1}{\chi_b^{(0)}} \frac{\partial \Phi_{2Nb}}{\partial t} = -\frac{1}{2} \left(\delta_{2b} \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\delta_b}{\chi_b^{(0)}} \frac{\partial}{\partial t} \right) [\Phi_{Lb}^2(t, x)]. \quad (10)$$

Отметим, что выражение для $\Phi_{Li}(t, x)$ получено в [1].

Решая систему уравнений (7) – (10), мы получили необходимое выражение для $\delta p(2\omega)$ – величины колебания давления в газовом слое на частоте ВГ. Ниже приводим ряд конкретных результатов, следующих из этого выражения и являющихся достаточно интересными.

А. Предположим, что первый слой является непрозрачным, для которого

$$l_{S(1)} \gg \mu_{\beta(1)}, \quad \exp(-l_{S(1)}\beta_1^{(0)}) \approx 0,$$

где $\mu_{\beta(i)}(\omega) = (\beta_i^{(0)})^{-1}$.

1а. Считаем оба слоя термически толстыми с условиями $l_{S(1)} \gg \mu_{\beta(1)}(\omega)$, $l_{S(1)} \gg \mu_{2S(1)}(\omega)$, $\mu_{2S(1)} \gg \mu_{\beta(1)}(\omega)$, $l_{S(2)} \gg \mu_{2S(2)}(\omega)$.

Выполняя соответствующие вычисления, получаем

$$\delta p_{2(1)}(2\omega) = \frac{\gamma p_0}{T_0 l_g} \frac{I_0^2 (A_{S(1)}^{(0)})^2 \mu_{2g} \mu_{2S(1)}^2}{8\sqrt{2} (k_{S(1)}^{(0)})^2} e^{-i\pi/4} \times \\ \times K_{2N(1)}(l_{S(1)} \gg \mu_{2S(1)}, \mu_{2S(1)} \gg \mu_{\beta(1)}, l_{S(2)} \gg \mu_{2g}), \quad (11)$$

где p_0 и T_0 – давление и температура окружающей среды, а γ – показатель адиабаты, $\mu_{2i} = (\omega/4\chi_i^{(0)})^{1/2}$ – длина тепловой диффузии ВГ тепловой волны.

2а. Считаем оба слоя термически толстыми с условиями $l_{S(1)} \gg \mu_{\beta(1)}(\omega)$, $l_{S(1)} > \mu_{2S(1)}(\omega)$, $\mu_{2S(1)} \ll \mu_{\beta(1)}(\omega)$, $l_{S(2)} \gg \mu_{2S(2)}(\omega)$.

Тогда из (25) получаем

$$\delta p_{2(2)}(2\omega) = \frac{\gamma p_0}{T_0 l_g} \frac{I_0^2 (A_{S(1)}^{(0)})^2 \mu_{2g} \mu_{2S(1)}^4 e^{-i3\pi/4}}{8\sqrt{2} (k_{S(1)}^{(0)})^2 \mu_{\beta(1)}^2} \times \\ \times K_{2N(2)}(l_{S(1)} \gg \mu_{2S(1)}, \mu_{2S(1)} \ll \mu_{\beta(1)}, l_{S(2)} \gg \mu_{2S(2)}). \quad (12)$$

3а. Считаем первый слой термически тонким, а второй – термически толстым с условиями $l_{S(1)} \gg \mu_{\beta(1)}(\omega)$, $l_{S(1)} \ll \mu_{2S(1)}(\omega)$, $\mu_{2S(1)} \gg \mu_{\beta(1)}(\omega)$ и $l_{S(2)} \gg \mu_{2S(2)}(\omega)$. В этом случае справедливо выражение

$$\delta p_{2(3)}(2\omega) = \frac{\gamma p_0}{T_0 l_g} \frac{I_0^2 (A_{S(1)}^{(0)})^2 \mu_{2g} \mu_{2S(2)}^2 e^{-i\pi/4}}{8\sqrt{2} (k_{S(2)}^{(0)})^2} \times \\ \times K_{2N(3)}(l_{S(1)} \ll \mu_{2S(1)}, \mu_{2S(1)} \gg \mu_{\beta 1}, l_{S(2)} \gg \mu_{2S(2)}). \quad (13)$$

4а. Считаем оба слоя термически тонкими с условиями $l_{S(1)} \gg \mu_{\beta(1)}(\omega)$, $l_{S(1)} \ll \mu_{2S(1)}(\omega)$, $\mu_{2S(1)} \gg \mu_{\beta(1)}(\omega)$ и $l_{S(2)} \ll \mu_{2(2)}(\omega)$. Тогда для этого случая будем иметь

$$\delta p_{2(4)}(2\omega) = \frac{\gamma p_0}{T_0 l_g} \frac{I_0^2 (A_{S(2)}^{(0)})^2 (1 - R_{S(1)}^{(0)})^2 \mu_{2g} \mu_{2b}^2 e^{-i\pi/4}}{8\sqrt{2} (k_b^{(0)})^2} \times \\ \times K_{2N(4)}(l_{S(1)} \beta_1 \gg 1, l_{S(1)} \ll \mu_{2S(1)}, \mu_{2S(1)} \gg \mu_{\beta 1}, l_{S(2)} \ll \mu_{2S(2)}). \quad (14)$$

Величины

$$K_{2N}(l_{S(i)} \gg \mu_{2S(i)}, \mu_{2S(i)} \gg \mu_{\beta 1}) = \\ = \frac{(\sqrt{2}-1)}{\sqrt{2}} (2\delta_{2g} - \delta_g - 2\delta_{2S(1)} - \sqrt{2}\delta_{S(1)}) + \sqrt{2}(\delta_{3S(1)} + \delta_{4S(1)}),$$

$$K_{2N(2)}(l_{S(1)} \gg \mu_{2S(1)}, \mu_{2S(1)} \ll \mu_{\beta 1}, l_{S(2)} \gg \mu_{2S(2)}) = \\ = \frac{(\sqrt{2}-1)}{\sqrt{2}} (2\delta_{2g} - \delta_g) + (\delta_{3S(1)} + \delta_{4S(1)} - \delta_{S(1)}),$$

$$K_{2N(3)}(l_{S(1)} \ll \mu_{2S(1)}, |r_1| > 1, l_{S(2)} \gg \mu_{2S(2)}) = \\ = \frac{(\sqrt{2}-1)}{\sqrt{2}} (2\delta_{2g} - \delta_g - 2\delta_{2S(2)} - \sqrt{2}\delta_{S(2)}) + \sqrt{2}(\delta_{3S(1)} + \delta_{4S(1)}),$$

$$K_{2N(4)}(l_{S(1)} \beta_1 \gg 1, l_{S(i)} \ll \mu_{2S(i)}, |r_1| > 1) = \\ = \frac{(\sqrt{2}-1)}{\sqrt{2}} (2\delta_{2g} - \delta_g - \sqrt{2}\delta_b - 2\delta_{2b}) + \sqrt{2}(\delta_{3S(1)} + \delta_{4S(1)})$$

в выражениях (11) – (14) являются искомыми нелинейными коэффициентами для соответствующих случаев и состоят из комбинации ТК теплофизических параметров, оптического коэффициента поглощения и поглощательной способности слоев.

Б. Первый слой является прозрачным, а второй непрозрачным. Тогда справедливо $\exp(-l_{S(2)}\beta_2^{(0)}) \approx 0$, $l_{S(1)}\beta_1 \ll 1$, $\exp(-l_{S(1)}\beta_1^{(0)}) \approx 1 - l_{S(1)}\beta_1^{(0)}$.

1б. Считаем оба слоя термически тонкими с условиями $l_{S(1)} \ll \mu_{2S(1)}(\omega)$, $l_{S(2)} \ll \mu_{2S(2)}(\omega)$, $|r_1| > 1$ и $|r_2| > 1$, где $r_i = (1-i)\beta_i^{(0)}\mu_i^{(0)}/2$. После соответствующих вычислений будем иметь

$$\delta p_{2(5)}(2\omega) = \frac{\gamma p_0}{T_0 l_g} \frac{I_0^2 (A_{S(2)}^{(0)})^2 (1 - R_{S(1)}^{(0)})^2 \mu_{2g} \mu_{2b}^2 e^{-i\pi/4}}{8\sqrt{2} (k_b^{(0)})^2} \times \\ \times K_{2N(5)}(l_{S(1)} \ll \mu_{2S(1)}, |r_i| > 1, l_{S(2)} \ll \mu_{2S(2)}), \quad (15)$$

$$K_{2N(5)}(l_{S(1)} \ll \mu_{2S(1)}, |r_i| > 1, l_{S(2)} \ll \mu_{2S(2)}) = \\ = \frac{(\sqrt{2}-1)}{\sqrt{2}} (2\delta_{2g} - \delta_g - 2\delta_{2b} - \sqrt{2}\delta_b) + \sqrt{2}(\delta_{3S(2)} + \delta_{4S(2)}).$$

2б. Считаем первый слой термически тонким, а второй термически толстым с условиями: $l_{S(1)} \ll \mu_{2S(1)}(\omega)$, $|r_1| \gg 1$, $|r_2| \gg 1$ и $l_{S(2)} \gg \mu_{2S(2)}(\omega)$. Для этого случая справедливо выражение

$$\delta p_{2(6)}(2\omega) = \frac{\gamma p_0}{T_0 l_g} \frac{I_0^2 (A_{S(2)}^{(0)} (1 - R_{S(1)}^{(0)}))^2 \mu_{2g} \mu_{2S(2)}^2 e^{-i\pi/4}}{8\sqrt{2} (k_{S(2)}^{(0)})^2} \times \\ \times K_{2N(6)}(l_{S(1)}\beta_1 \ll 1, \beta_2 l_{S(2)} \gg 1, l_{S(1)} \ll \mu_{2S(1)}, |r_i| > 1, l_{S(2)} \gg \mu_{2S(2)}), \quad (16)$$

$$K_{2N(6)}(l_{S(1)} \ll \mu_{2S(1)}, |r_i| > 1, l_{S(2)} \gg \mu_{2S(2)}) = \\ = \frac{(\sqrt{2}-1)}{\sqrt{2}} [2\delta_{2g} - \delta_g - 2\delta_{2S(2)} - \sqrt{2}\delta_{S(2)}] + \sqrt{2}(\delta_{3S(2)} + \delta_{4S(2)}).$$

Из анализа выражений для нелинейных коэффициентов следует, что во всех рассмотренных случаях ТК оптического коэффициента поглощения слоев входят аддитивно с величиной ТК поглощательной способности этих же слоев. Следовательно, экспериментальное измерение амплитуды этого сигнала позволяет определить не только абсолютную величину оптического коэффициента поглощения, но и ее температурную зависимость.

Список литературы

1. Fujii, Y. Photoacoustic Spectroscopy Theory for Multi-Layered Samples and Interference Effect / Y. Fujii, A. Moritani, J. Nakai // Jpn. J. Appl. Phys. – 1981. – V. 20, N 2. – P. 361 – 367.

**CONTRIBUTION OF THE TEMPERATURE DEPENDENCE
OF OPTICAL ABSORPTION COEFFICIENT
ON THE PARAMETRS OF THE SECOND HARMONIC
OF A NONLINEAR PHOTOACOUSTIC SIGNAL
IN OPTOCALLY INHOMOGENEOUS TWO – LAUER SYSTEMS**

T. Kh. Salikhov, A. Mahmalatif

Research Institute Tajik National University, Dushanbe, Tajikistan

Abstract. A theory of second harmonic generation (SH) of a nonlinear photoacoustic (PA) signal in optically inhomogeneous two – layer samples is proposed. For the most interesting cases, the dependencies of the amplitudes and phases of this signal on the frequency of modulation of the incident beam and the thermal coefficients (TC) of thermophysical and optical parameters, including the optical absorption coefficient, are established.

Keywords: photoacoustics, thermal nonlinearity, two-layer systems, nonlinear photoacoustic response, second harmonic, optical inhomogeneity.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ
ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ**

З. М. Селиванова, Д. С. Куренков

*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный
технический университет», Тамбов
selivanova@mail.jesby.tstu.ru*

Аннотация. Разработаны математические модели сигналов с измерительного зонда и преобразования сигналов в измерительном канале созданной интеллектуальной информационно-измерительной системы для повышения точности определения теплофизических свойств твердых материалов и помехозащищенности измерительного канала при дистанционном контроле.

Ключевые слова: интеллектуальная информационно-измерительная система, моделирование сигналов, теплофизические свойства материалов, дистанционный контроль.

Дистанционный контроль теплофизических свойств (ТФС) теплоизоляционных, строительных, полимерных и других материалов интеллектуальной информационно-измерительной системой (ИИИС) непосредственно в производственном цехе предприятия, при влиянии дестабилизирующих факторов (ДФ) является актуальным и важным. На рисунке 1 представлена разработанная структурная схема ИИИС ДК ТФС материалов.

Для обеспечения точности ДК ТФС материалов и помехоустойчивости ИК ИИИС разработаны и исследованы математические модели сигналов с измерительного зонда и канала системы в программной среде Mathcad [1]. Решение задачи теплопроводности при воздействии линейным источником тепла на исследуемый материал, при котором осуществляется распространение тепла на теплоизолированной поверхности полубесконечного в тепловом отношении тела, имеет следующий вид [2]:

$$T(x, \tau) = \frac{Q}{4\pi\lambda\tau} \exp\left(-\frac{x^2}{4a\tau}\right), \quad (1)$$

где $T(x, \tau)$ – температура; Q – мощность теплового воздействия; τ – время; x – расстояние от точки контроля до линейного источника тепла; λ и a – коэффициенты тепло- и температуропроводности.



Рис. 1. Структурная схема ИИИС дистанционного контроля ТФС материалов

В выражении (1) введем обозначения параметров:

$$\frac{Q}{4\pi\lambda} = C; \quad -\frac{x^2}{4a\tau} = D.$$

Тогда температура $T(x, \tau)$ (1) будет представлена в следующем виде:

$$T(x, \tau) = \frac{C}{\tau} \exp\left(\frac{D}{\tau}\right).$$

При передаче измерительной информации ИИИС на передаваемый сигнал влияют возмущающие воздействия случайного характера, вследствие этого введены случайные функции в математическую модель сигнала с измерительного зонда (1), соответствующего измеренной температуре

$$T(x, \tau) = L(\tau) \frac{C}{\tau} \exp\left(\frac{D}{\tau}\right) + F(\tau),$$

где $L(\tau)$ и $F(\tau)$ – функции, соответствующие случайным погрешностям измерительного зонда ИИИС в результате воздействия ДФ.

Параметры модели в среде Mathcad заданы интервальными значениями:

$$C \in [0 \dots 50]; D \in [-100 \dots -50]; L(\tau) \in [0,5 \dots 10]; F(\tau) \in [0 \dots 0,001].$$

На рисунке 2 представлены термограммы сигналов с измерительного зонда при воздействии случайных помех. Математическая модель ИК $U(\tau)$ в ИИИС ТФС материалов представлена в общем виде: $U(\tau) = B(\tau) + F(\tau)$, где $B(\tau)$ – функция, зависящая от измерительного сигнала ИЗ ИИИС, поступающего в измерительный канал; $F(\tau)$ – случайная функция, не зависящая от сигнала, который формирует шум или аддитивную помеху.

Разработана математическая модель ИК с учетом преобразования сигнала с измерительного зонда:

$$B(\tau) = T(x, \tau) \cdot S(\tau) = T(x, \tau)[K_U + I(\tau)] + E(\tau),$$

где $S(\tau)$ – функция, соответствующая процессу преобразования сигнала $T(x, \tau)$ в ИК; K_U – коэффициент усиления усилителя ИК; $I(\tau)$ – функция, описывающая искажения измерительного сигнала в усилителе; $E(\tau)$ – функция, учитывающая погрешность преобразования сигнала в аналого-цифровом преобразователе.

Модель шума, как аддитивная смесь узкополосных случайных процессов, имеет следующий вид [3]:

$$F(\tau) = A(\tau)\cos[\omega(\tau) + \varphi(\tau)],$$

где $A(\tau)$, $\omega(\tau)$, $\varphi(\tau)$ – соответственно, амплитуда, частота и фаза случайного сигнала помехи.

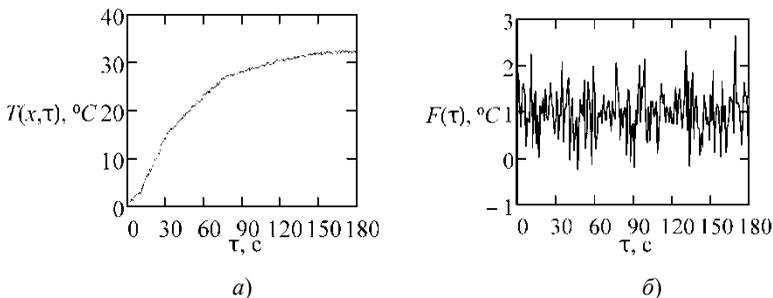


Рис. 2. Термограмма сигнала измерительного зонда при воздействии случайных помех (а); результаты моделирования аддитивной помехи в ИК в Mathcad (б)

Созданная математическая модель ИК ИИИС с учетом $B(\tau)$ имеет вид

$$U(\tau) = T(x, \tau)[K_U + I(\tau)] + E(\tau) + A(\tau)\cos[\omega(\tau) + \varphi(\tau)].$$

Разработанные математические модели измерительных сигналов ИИИС применяются при проведении теплофизических исследований твердых материалов для повышения точности измерительной информации.

Список литературы

1. Берков, Н. А. Применение пакета Mathcad. Практикум / Н. А. Берков, Н. Н. Елисеева. – М. : МГИУ, 2007. – 132 с.
2. Платунов, Е. С. Теплофизические измерения и приборы / Е. С. Платунов и др. – Л. : Энергия, 1973. – 256 с.
3. Баскаков, С. И. Радиотехнические цепи и сигналы / С. И. Баскаков. – М. : Ленанд, 2016. – 528 с.

MODELING OF MEASURING SIGNALS OF INTELLECTUAL INFORMATION AND MEASURING SYSTEM OF REMOTE CONTROL HEATPHYSICAL PROPERTIES OF SOLID MATERIALS

Z. M. Selivanova, D. S. Kurenkov

Tambov State Technical University, Tambov

selivanova@mail.jesby.tstu.ru

Abstract. Mathematical models of signals from the measuring probe and transformation of signals in the measuring channel of the created intellectual information and measuring system are developed for increase in accuracy of determination of heatphysical properties of solid materials and noise immunity of the measuring channel at remote control.

Keywords: intellectual information – the measuring system, modeling of signals, heatphysical properties of materials, remote control.

ПОСТРОЕНИЕ ГИС ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

К. А. Слезин, Г. Н. Нурутдинов, М. А. Ивановский
*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный
технический университет», Тамбов*
gromovtambov@yandex.ru

Аннотация. В статье рассмотрены некоторые геоинформационные системы, а также выявлены их основные достоинства и недостатки. Описан подход к моделированию динамики лесных пожаров при помощи геометрического представления расширяющихся контуров. Разработана модель равномерно распределяющегося контура. Рассмотрен процесс моделирования в ГИС реального пожара.

Ключевые слова: моделирование, аварии, катастрофы, геоинформация, информационная система, динамика.

С развитием информационных технологий, а также глобальной сети Интернет становятся все более популярными системы географического характера. Большинство данных информационных систем предоставляют функции по работе со статическими данными. Особый интерес вызывают геоинформационные системы, способные моделировать те или иные динамические процессы. Наиболее часто предоставляются функции по моделированию или расчету маршрутов движения транспортных средств.

В связи с все большим учащением техногенных аварий и катастроф, в частности, лесных пожаров, становятся все более актуальными интеллектуальные геоинформационные системы, предоставляющие набор функций по анализу и моделированию данных процессов. Большинство современных геоинформационных систем [1 – 4] имеют архитектуру, приведенную на рис. 1, которая реализует минимальный набор функций по обработке геоданных и видов их представления.

Однако данная архитектура не обладает средствами моделирования, а также принятия решений, что не позволяет использовать их при оценке рисков во время техногенных аварий и катастроф, например, лесных пожаров, противодействие которым напрямую связано с возможностью предсказания их развития.

Расширим данную структуру подсистемами знаний, правил, а также поддержки принятия решений, включающей блоки обработки качественной информации, лингвистические и математические модели. Полученная архитектура (рис. 2) позволит обрабатывать качественную

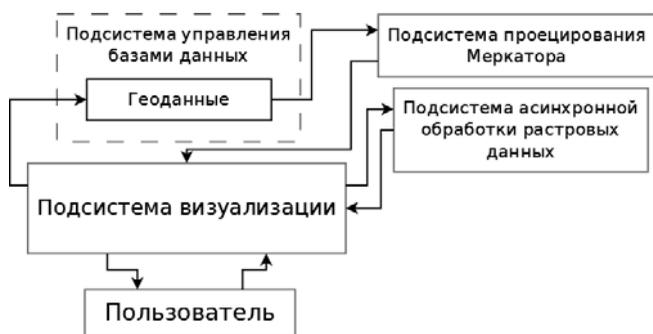


Рис. 1. Архитектура ГИС



Рис. 2. Архитектура ИГИС

информацию об окружающей среде и на основе ее обработки при помощи лингвистических и математических модулей производить моделирование динамических геопроцессов.

На основании выбранной архитектуры построено кроссплатформенное портативное приложение, интерфейс которого имеет модульную структуру, меню, содержащее различные функции, нацеленные на управление внешним и внутренним хранилищами, а также динамикой моделирования «живых» объектов.

Используя разработанную геоинформационную систему, произведем моделирование пожара, начавшегося в точке 58.4429 СШ и 107.123 ВД 22.06.2017 (рис. 3). Охваченная пожаром площадь представлена на рис. 4 [5]. В качестве математической модели динамики контура выбранного пожара была использована одна из простейших методик построения, а именно, эллиптическое распределение со смещающимся эксцентриситетом. На основании имеющихся данных и выбранной модели были произведены имитационные испытания (рис. 5).

Анализ рис. 4, 5 показывает, что разработанная геоинформационная система даже с применением примитивных моделей динамики контуров предоставляет возможность первичной оценки рисков при возникновении пожаров.

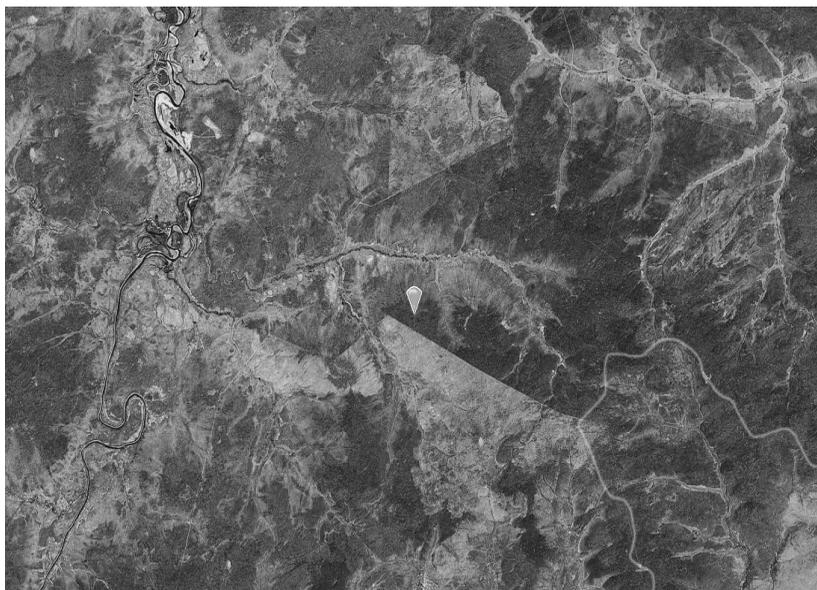


Рис. 3. Начало пожара



Рис. 4. Охваченная пожаром площадь

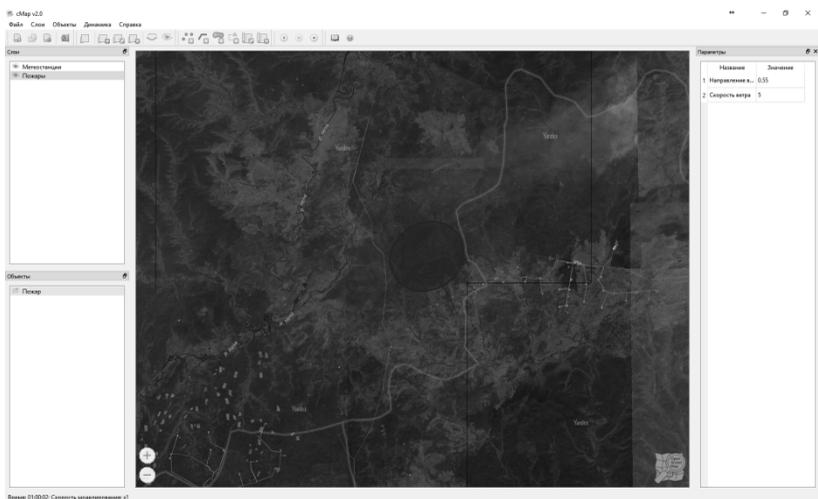


Рис. 5. Результаты имитации

Список литературы

1. Сведения на Google Картах, предоставленные пользователями – Справка – Карты [Электронный ресурс] // Google Карты. [сайт]. – URL: <https://support.google.com/maps/answer/7576020?hl=ru> = ru (дата обращения: 01.02.2018).

2. О Яндекс.Картах [Электронный ресурс] // Яндекс.Карты. [сайт]. – URL: <https://yandex.ru/support/maps/> (дата обращения: 01.02.2018).
3. OpenStreetMap [Электронный ресурс] // OpenStreetMap. [сайт]. – URL: <https://www.openstreetmap.org/about> (дата обращения: 01.02.2018).
4. Wikimapia / About [Электронный ресурс] // Wikimapia. [сайт]. – URL: <http://wikimapia.org/about/> (дата обращения: 01.02.2018)
5. Космоснимки – мониторинг природных пожаров, карта пожаров [Электронный ресурс] / Космоснимки – мониторинг природных пожаров, карта пожаров. – URL: <http://fires.kosmosnimki.ru/> (дата обращения: 01.02.2018)

BUILDING A GIS FOR MODELING FOREST FIRES

K. A. Slezin, G. N. Nurutdinov, M. A. Ivanovsky

Tambov State Technical University, Tambov

gromovtambov@yandex.ru

Abstract. In the article some geoinformation systems are considered, and their main advantages and disadvantages are revealed. An approach to modeling the dynamics of forest fires is described using the geometric representation of expanding contours. A model of a uniformly distributed contour is developed. The process of modeling a real fire in a GIS is considered.

Keywords: modeling, crashes, catastrophes, geoinformation, information system, dynamics.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОНЕЧЕТКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ КОНТУРОВ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

К. А. Слезин, А. П. Рыжков, В. В. Севенюк
*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный
технический университет», Тамбов
gromvtambov@yandex.ru*

Аннотация. В работе предлагается способ классификации моделей пожаров для интеллектуальной геоинформационной системы, основанный на нейронечеткой сети. Рассматривается пример правил начального нечеткого разбиения и структура разработанного классификатора. Приводится пример работы разработанной интеллектуальной геоинформационной системы.

Ключевые слова: геоинформационная система, моделирование, распространение пожаров, контуры пожаров, динамика, нечеткая логика, нейронечеткие сети.

Особую опасность в последние годы представляют лесные пожары. Ежегодно на земле возникает до 400 тысяч лесных пожаров, повреждающих около 0,5% общей площади лесов и выбрасывающих в атмосферу миллионы тонн продуктов горения. В связи с этим все более актуальной становится область моделирования лесных пожаров с использованием геоинформационных систем.

Сложность мониторинга параметров окружающей среды приводит к необходимости использования качественных характеристик. Исходя из невозможности определить количественные данные, а также опасности для жизни человека, предложено использовать гибридную нечеткую сеть [1, 2, 3], осуществляющую классификацию параметров источника горения и окружающей среды в целях выбора оптимальной аналитической модели. Для начального нечеткого разбиения сгенерирован ряд правил:

П₁: ЕСЛИ $x_1^{(n)}$ есть {малый} И $x_2^{(n)}$ есть {малый} И $x_3^{(n)}$ есть {малый}
ТО $x^{(n)} = (x_1^{(n)}, x_2^{(n)}, x_3^{(n)})$ принадлежит к классу C_1

П₂: ЕСЛИ $x_1^{(n)}$ есть {малый} И $x_2^{(n)}$ есть {малый} И $x_3^{(n)}$ есть {средний}
ТО $x^{(n)} = (x_1^{(n)}, x_2^{(n)}, x_3^{(n)})$ принадлежит к классу C_2

...

П₁₃: ЕСЛИ $x_1^{(n)}$ есть {большой}
 ТО $x^{(n)} = (x_1^{(n)}, x_2^{(n)}, x_3^{(n)})$ принадлежит к классу C_3 .

На основании предложенных правил построена архитектура гибридного нейронечеткого классификатора (рис. 1).

Используя данную модель классификации пожаров, была разработана геоинформационная система моделирования лесных пожаров.

Для примера работы системы было произведено моделирование лесного пожара, произошедшего неподалеку от населенного пункта Багдарин республики Бурятия (54°31'19.2» СШ, 114°13'33.6» ВД) 09.06.2017 – 11.06.2017 [4] (рис. 2).

На рисунке 3 представлены результаты моделирования, описывающие контур пожара, спустя 2 суток после начала возгорания.

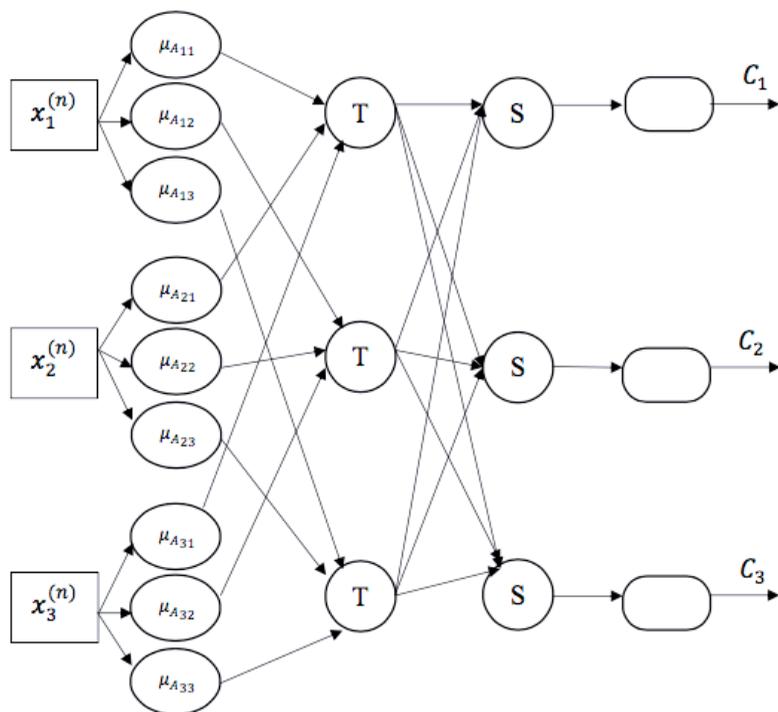


Рис. 1. Структура гибридного нейронечеткого классификатора



Рис. 2. Спутниковый снимок пожара 11.06.2018



Рис. 3. Результат работы выбранной классификатором модели

Наложив рис. 2 и 3 друг на друга, был получен рис. 4, анализ которого, позволяет сделать вывод, что разработанный нейронечеткий классификатор достаточно точно определил класс пожара и выбрал подходящую для него модель.



Рис. 4. Совмещенное изображение рис. 2 и 3

Список литературы

1. Борисов, В. В. Нечеткие модели и сети / В. В. Борисов, В. В. Круглов, А. С. Федулов. – 2-е изд. – М. : Горячая линия–Телеком, 2012. – 284 с.
2. Круглов, В. В. Интеллектуальные информационные системы / В. В. Круглов. – Изд-во Физико-математической литературы, 2002. – 227 с.
3. Chaib-draa, B. A relational model of cognitive maps / B. Chaib-draa, J. Decharnais // Int. J. Human-Computer Studies. – 1998. – Т. 49. – С. 181 – 200.
4. Космоснимки – мониторинг природных пожаров [Электронный ресурс] // Карта пожаров. – URL : <http://fires.ru> (дата обращения: 01.09.2018).

**THE USE OF NEURON-FUZZY CLASSIFICATION
FOR MODELING THE DYNAMICS OF THE CONTOURS
OF FOREST FIRES**

K. A. Slezin, A. P. Ryzhkov, V. V. Sevenyuk
Tambov State Technical University, Tambov
gromovtambov@yandex.ru

Abstract. The paper proposes a method for classifying fire models for an intellectual geoinformation system based on a neuron-fuzzy network. An example of the rules of the initial fuzzy partition and the structure of the developed classifier are considered. An example of the work of the developed intellectual geoinformation system is given.

Keywords: geoinformation system, modeling, fire propagation, fire contours, dynamics, fuzzy logic, neuron-fuzzy networks.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕМПОРАЛЬНОЙ БАЗЫ ДАННЫХ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТОВ

П. А. Трефилов, Ю. В. Минин, Н. Г. Шахов
*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный
технический университет», Тамбов*

Аннотация. В работе рассмотрена проблема представления данных теплофизических измерений и экспериментов в реляционных базах данных. Предложен способ хранения с использованием темпоральной модели данных Йенсена–Снодграса.

Ключевые слова: реляционная база данных, темпоральная модель данных, модель Йенсена–Снодграса.

Проведение теплофизических измерений и экспериментов является неотъемлемой частью изучения свойств материалов. Такие измерения применимы к широкому спектру областей человеческой деятельности – от исследований теплофизических свойств грунта при проектировании и строительстве до теплофизических исследований свойств металлов в военной или космической отраслях.

В разных конкретных условиях лимитирующими, определяющими реальную кинетику процесса, могут оказываться разные явления или наборы явлений. Для их описания используются разнообразные виды подходов и моделей: феноменологические и статистические, сплошной и дискретной среды, разного уровня, теоретические, инженерные и эмпирические, вплоть до «черного ящика» (из которого при творческом подходе тоже можно извлечь информацию, имеющую познавательный смысл) [1].

Эксперименты проводятся при различных условиях (погодных, температурных и т.п.) и в различное время. При таком подходе важной задачей является хранение результатов всех предыдущих измерений с учетом условий, при которых данных эксперимент проводился. Для последующего доступа к результатам измерений, а также автоматизированной обработки результатов целесообразно использовать реляционную базу данных. Однако реляционные базы данных имеют недостаток – они хранят только последний снимок предметной области, при добавлении нового результата предыдущий будет перезаписан. Данная проблема решается при помощи использования темпоральных баз данных.

Темпоральные данные [2] – данные, изменяемые с течением времени. Темпоральные данные бывают двух видов: временной момент и временной интервал. Хранение темпоральных данных возможно реализовать с помощью традиционной реляционной модели и с использованием известных реляционных СУБД.

На сегодняшний день не существует полноценной темпоральной базы данных (ТБД) – существуют лишь различные модули и плагины к популярным коммерческим СУБД. Все эти надстройки обладают рядом недостатков, в частности – при проектировании темпоральной структуры не существует какого-либо универсального метода, позволяющего спроектировать гибкую логическую структуру, применимую сразу к множеству предметных областей.

Темпоральная база данных строится одним из следующих способов:

- преобразование запросов на уровне ядра СУБД;
- преобразование на уровне пользовательского приложения;
- реализация темпоральной модели данных на основе реляционной модели.

В практических задачах проектирования темпоральной структуры БД наиболее часто используется модель Йенсена–Снодграсса [3, 4] с реализацией в реляционной СУБД. Модель представлена как

$$T = (AS, TS, AF, TF),$$

где AS – момент актуализации значения; TS – время записи факта в БД; AF – момент утраты актуальности; TF – время удаления факта из БД.

Пусть $R = (a1, a2, a3, a4, t1, t2)$ – некое отношение, где $a1, a2, a3$ – статичные (не изменяющиеся во времени) атрибуты, а $t1, t2$ – темпоральные атрибуты. Пусть $t1$ – темпоральный момент времени, а $t2$ – темпоральный интервал. При использовании в качестве темпоральной метки $T = (AS, TS, AF, TF)$ структура будет одинакова как для момента времени, так и для временного интервала.

Поскольку речь идет о темпоральных атрибутах, любое добавление, изменение и удаление записи повлечет за собой добавление строки в исходную таблицу. При этом значения нетемпоральных атрибутов будут дублироваться, что повлечет за собой избыточность данных.

Для того, чтобы избавиться от избыточности, отношение R нормализовано и приведено к

$$R = (RS, Rt1, Rt2, \dots, Rtn),$$

где RS – отношение, состоящее из нетемпоральных атрибутов; $Rt1, Rt2, \dots, Rtn$ – отношения, описывающие изменения темпоральных атрибутов.

В настоящее время идея представления темпоральных данных в традиционных реляционных моделях активно развивается. Среди последних работ имеются работы О. В. Ланкина и Н. Ю. Петуховой [5, 6], где приводятся примеры практического применения ТБД в определенной сфере человеческой деятельности.

Список литературы

1. Гатапова, Н. Ц. Методология комплексных теплофизических измерений и экспериментальных исследований процессов сушки материалов с существенной температурной кинетикой / Н. Ц. Гатапова, В. И. Коновалов // Теплофизические измерения при контроле и управлении качеством. – Тамбов, 2014.
2. Тоноян, С. А. Темпоральные модели базы данных и их свойства [Электронный ресурс] / С. А. Тоноян, Д. В. Сараев // Статья, опубликованная в 12-м выпуске журнала «Инженерный журнал: наука и инновации» за 2014 г. – URL: <http://engjournal.ru/catalog/it/hidden/1333.html> (дата обращения: 15.09.2018).
3. Jensen, C. S. Extending Normal Forms to Temporal Relations / C. S. Jensen, R. Snodgrass, M. D. Soo // Technical Report TR-92-17. Department of Computer Science, University of Arizona, Tucson, AZ, 1992.
4. Jensen, C. S. Unifying Temporal Data Models Via Conceptual Model / C. S. Jensen, M. D. Soo, R. T. Snodgrass // Information Systems. – 1994. – V. 19, N 7. – P. 513 – 547.
5. Ланкин О. В. Темпорально-реляционный подход к организации информационного обеспечения автоматизированных систем управления критического применения: монография / О. В. Ланкин. – Воронеж: Воронежский ЦНТИ – филиал ФГБУ «РЭА Минэнерго России», 2013. – 246 с.
6. Петухова, Н. Ю. Темпоральные модели данных в информационных системах на железнодорожном транспорте: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Н. Ю. Петухова. – Рига, 2010. – 58 с.

THE USE OF A TEMPORAL DATABASE IN THE CONDUCT OF THERMOPHYSICAL MEASUREMENTS AND EXPERIMENTS

P. A. Trefilov, Yu. V. Minin, N. G. Shakhov
Tambov State Technical University, Tambov

Abstract. The problem of representation of data of thermophysical measurements and experiments in relational databases is considered. A method of storage using the temporal model of Jensen–Snodgrass data is proposed.

Keywords: relational database, temporal data model, Jensen–Snodgrass model.

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ОПЕРАТИВНОЙ КРИМИНАЛИСТИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ НАРКОТИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

В. Н. Чернышов

*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный
технический университет», Тамбов*

Аннотация. Рассмотрены физические основы создания электронных аналогов нозодов. Разработана ячейка хранения электронного аналога и микропроцессорная система оперативной криминалистической экспертизы наркотических веществ.

Ключевые слова: героин, криминалистическая экспертиза, нозод, полиритоны, экситоны, электронный аналог.

В практике криминалистических экспертиз может применяться методика Фолля как способ тестирования лекарственных, в том числе наркотических препаратов. Использование методики применительно к криминалистическим экспертизам ограничено проведением исследований в стационарных условиях, поскольку необходимо иметь достаточно большой набор нозодов, и связано со значительными временными затратами на поиск необходимых образцов и последовательное тестирование каждого из них. Кроме того, методика по своей сути исключает параллельное тестирование нескольких нозодов, а также проверку их качества.

В этой связи представляет интерес создание электронных аналогов нозодов, что позволит разработать более мобильную методику тестирования с дополнительными возможностями: оперативное изготовление нестандартных нозодов, создание микропроцессорной системы криминалистической экспертизы наркотических веществ, дистанционное тестирование исследуемых объектов по телефонной линии [1].

Понятие электронного аналога следует дополнительно уточнить. В данном случае это энергетический волновой пакет, отражающий в достаточной степени структуру реального объекта с возможностью хранения, копирования и коммутации этого пакета. В качестве предпосылки принималась возможность представления структуры тестируемого объекта в виде энергетических полей. Разработку электронного аналога нозодов проводили в рамках классической схемы Фолля, а описание физических процессов проводили с учетом работ в области исследований возбужденных состояний в твердых телах [2 – 4].

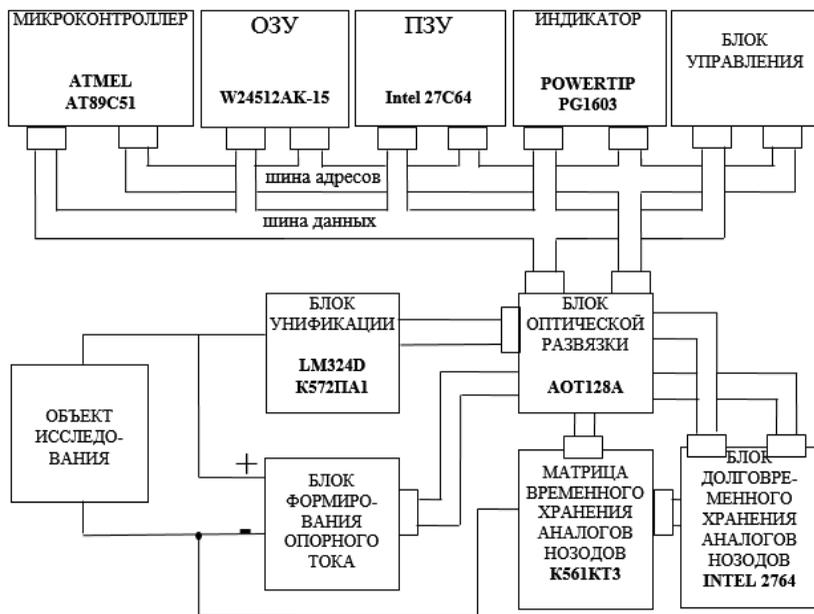


Рис. 1. Функциональная схема микропроцессорной системы экспресс-контроля наркотических веществ в организме человека

На рисунке 1 представлена функциональная схема разработанной микропроцессорной системы экспресс-контроля наркотических веществ в биологических объектах.

Основным блоком системы контроля является 8-разрядный микроконтроллер ATMEL AT89C51, который управляет функционированием всей системы в соответствии с алгоритмом. В качестве оперативного запоминающего устройства в системе используется статическая память W24512AK-15 объемом 32 Кбайт. Постоянное запоминающее устройство Intel 27C64 предназначено для хранения программного обеспечения системы, включая и программу управления.

Программное обеспечение (ПО) контроллера написано на языке ассемблера по модульному принципу и поэтому может быть легко модифицировано под конкретную задачу пользователя. Программное обеспечение включает: системное ПО, прикладное ПО, тестовое ПО. Системное ПО выполняет функцию арбитра между остальными группами программ и представляет им ресурсы системы по их запасам.

Прикладное ПО выполняет конкретную задачу пользователя и может использовать для своих нужд любые подпрограммы, имеющиеся в наличии. Оно осуществляет управление системой по заданному алгоритму, формирует необходимые временные задержки, обрабатывает результаты измерений и ведет диалог с пользователем. Таким образом, прикладное ПО является основным для данной системы.

Тестовое ПО предназначено для автоматической проверки работоспособности системы при включении и включает в себя тест ОЗУ, тест ПЗУ (проверку контрольной суммы), тест интерфейсных устройств и тест процессора.

Для динамической индикации результатов измерения в системе экспресс-контроля используется 3-строчный графический жидкокристаллический индикатор POWER TIP PG1603. Блок управления представляет собой емкостную клавиатурную матрицу 4×4.

Блок долговременного хранения электронных аналогов нозодов реализован на микросхеме Intel 2764, созданной по технологии лавинной инжекции заряда (нЛИЗМОП). Для временного хранения, накопления, объединения, уничтожения и т.д. нозодов в системе используется матрица электронных аналогов нозодов, основными элементами которой является CMOS – ключи K561 КТЗ.

Была проведена экспериментальная проверка работоспособности разработанной системы с использованием электронных аналогов наиболее распространенных наркотических веществ, таких как: марихуана, героин, опий-сырец, метадон и т.д. Формирование электронных аналогов этих наркотиков было осуществлено с использованием реальных наркотических веществ, представленных экспертно-криминалистическим управлением УВД Тамбовской области. Эксперимент показал полную идентификацию наличия наркотических веществ в исследуемых объектах, что позволяет сделать вывод о корректности предложенного информационно-энергетического подхода, положенного в основу создания экспертно-криминалистической системы оперативного контроля наркотических веществ.

Основными преимуществами разработанной системы является возможность оперативного контроля наличия наркотических веществ в исследуемых объектах в полевых условиях, а также расширение функциональных возможностей путем введения в систему энергоинформационных характеристик других веществ, например ядов, радионуклидов, алкоголя и т.д., представляющих большой интерес для криминалистической экспертизы.

Список литературы

1. Бенвенист, Ж. Тезисы к докладу на Московской Международной конференции «ВАЛАНТ» / Ж. Бенвенист. – 1997.
2. Нокс, Р. Теория экситонов / Р. Нокс. – М.: Мир, 1966. – 273 с.
3. Агранович, В. М. Теория экситонов / В. М. Агранович. – М.: Наука, 1968. – 384 с.
4. Шелохвостов, В. П. Методы и системы диагностики наноструктурированных сред и материалов / В. П. Шелохвостов, В. Н. Чернышов. – СПб.: Экспертные решения, 2017. – 224 с.

INFORMATION-MEASURING SYSTEM OF OPERATIONAL FORENSIC EXAMINATION OF NARCOTIC SUBSTANCES

V. N. Chernyshov

Tambov State Technical University, Tambov

Abstract. The physical bases for creating electronic analogs of nosodes are considered. An electronic analogue storage cell and a microprocessor-based system for rapid criminal analysis of narcotic substances have been developed.

Keywords: heroin, forensic examination, nosode, polaritons, excitons, electronic counterpart.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЯ ИЗ ФТОРОПЛАСТА НА МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ОСНОВАНИИ

А. Ю. Ярмизина, А. А. Желтов, О. Е. Богометова, Н. Ф. Майникова
*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный
технический университет», Тамбов
teplotehnika@nnn.tstu.ru*

Аннотация. Разработаны метод и измерительная система, реализующие способ неразрушающего определения толщины покрытий на металлических основаниях. Экспериментально получено подтверждение работоспособности метода и измерительной системы.

Ключевые слова: двухслойное изделие, защитное покрытие, измерительная система, математическая модель, металлическое основание, неразрушающий контроль, теплопроводность, толщина.

Среди методов и средств контроля особое место занимают контактные тепловые неразрушающие методы определения толщины низкотеплопроводных покрытий на металлических основаниях [1]. Реализация теплового неразрушающего метода осложнена тем, что тепловое воздействие и получение измерительной информации в ходе эксперимента возможно осуществлять только на ограниченном участке поверхности исследуемого объекта. Поэтому наиболее сложной и важной задачей при создании метода является разработка математической модели, адекватной реальному теплопереносу в объекте [1, 2].

Структурная схема измерительной системы (ИС), реализующей метод неразрушающего контроля (НК) толщины покрытий в двухслойных полимерно-металлических изделиях, представлена на рис. 1. ИС состоит из персонального компьютера, измерительно-управляющей платы, измерительного зонда (ИЗ), регулируемого блока питания. ИЗ обеспечивает создание теплового воздействия на исследуемый образец с помощью круглого плоского нагревателя постоянной мощности, температура в заданной точке контроля фиксируется термоэлектрическим преобразователем. Сбор информации проводится при нагреве.

Учено, что регулярные тепловые режимы первого и второго рода имеют общее свойство [3], характеризующееся независимостью от времени отношения теплового потока в любой точке тела к потоку тепла на его поверхности (q).

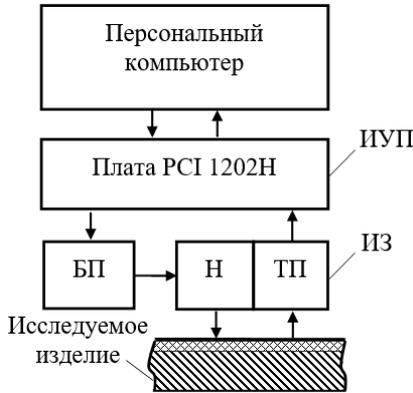


Рис. 1. Структурная схема ИС

Математическая модель распределения тепла в рассматриваемой системе может быть записана в виде прямой задачи теплопроводности, представленной в работе [2]. Измерительная схема метода представлена в работе [4].

Получено решение, которое было использовано при получении математического выражения для определения толщины полимерного покрытия h на металлическом основании [2]

$$h = \frac{\lambda_1 b_0}{q}$$

Здесь b_0 – коэффициент математической модели, определяемый из экспериментальной термограммы [4].

Из данного выражения можно определить толщину покрытия (h), если известна теплопроводность материала, из которого оно изготовлено.

Важны следующие аспекты применения предложенной математической модели распространения тепла в двухслойных объектах: начальное равномерное распределение температуры в объекте контроля; реализация одномерного распространения тепла в плоском полупространстве; наличие на термограмме температурно-временного участка, соответствующего локальной регуляризации тепловых потоков в локальной области исследуемого тела; соблюдение условия распространения тепла в полуограниченном теле [2].

Испытаниям подвергали четыре изделия, состоящих из стального основания с нанесенным на его поверхность покрытием из политетрафторэтилена (фторопласта-4). Толщина покрытия (измеренная) – $h_{из}$.

1. Экспериментальные значения

$h_{1н}$, мм	b_0	δ , %
0,02	12,90	3,8
0,04	11,05	5,2
0,06	12,04	1,0
0,08	11,25	0,8

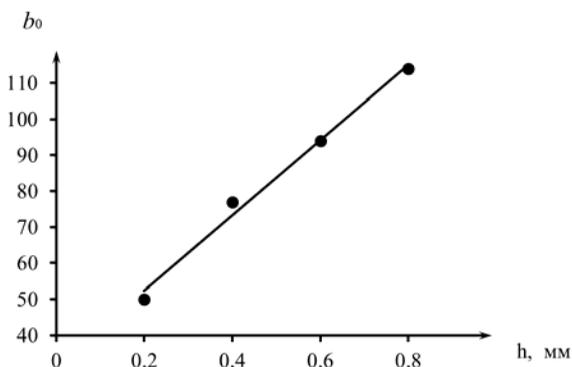


Рис. 2. Зависимость $b_0 = f(h_{1н})$

Подложка измерительного зонда – Рипор.

Режимы опытов: временной шаг измерения температуры – 0,25 с;

радиус нагревателя – 0,008 м

Проведены эксперименты при мощности теплового воздействия – 28 662 Вт/м². Получены термограммы. Определены коэффициенты математической модели – b_0 . По значениям b_0 и $h_{1н}$ (табл. 1) построена зависимость $b_0 = f(h_{1н})$, представленная на рис. 2.

Относительные погрешности (δ , %) определения толщины покрытия составили 0,8...5,2%.

Результаты эксперимента подтверждают работоспособность метода, более детальное описание которого представлено в работе [4].

Список литературы

1. Кудинов, В. А. Аналитические решения задач теплопереноса и термоупругости для многослойных конструкций / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов, В. В. Калашников. – М.: Высшая школа, 2005. – 430 с.

2. Моделирование теплопереноса в методе неразрушающего контроля двухслойных материалов / Н. П. Жуков, Н. Ф. Майникова, И. В. Рогов, А. О. Антонов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2013. – Т. 19, № 3. – С. 506 – 511.

3. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М.: Высшая школа, 1967. – 559 с.

4. 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.

DETERMINATION OF THE THICKNESS OF THE COATING OF PTFE ON A METAL SUBSTRATE

A. Yu. Yarmizina, A. A. Zheltov, O. E. Bogometova, N. F. Mainikova
Tambov State Technical University, Tambov
teplotehnika@nnn.tstu.ru

Abstract. The method and the measuring system realizing a method of non-destructive determination of thickness of coverings on the metal bases are developed. Experimental confirmation of the efficiency of the method and the measuring system was obtained.

Keywords: two-layer product, sheeting, measuring system, boundary value problem, mathematical model, metal base, non-destructive testing, thermal conductivity, thickness.

Научное издание

**ОДИННАДЦАТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКАЯ ШКОЛА
ИНФОРМАЦИОННО-СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ
В ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ**

В 2-х томах
Том I

Сборник научных статей

Инженеры по компьютерному макетированию:

И. В. Евсеева, Т. Ю. Зотова, М. Н. Рыжкова

Редакторы: Е. С. Мордасова, И. В. Калистратова, Л. В. Комбарова

Подписано в печать 26.10.2018.

Усл.-печ. л. 19,29. Тираж 400 экз. (1-й з-д 60). Заказ № 260

ISBN 978-5-8265-1957-8



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@admin.tstu.ru

Отпечатано в типографии ФГБОУ ВО «ТГТУ»
392008, г. Тамбов, ул. Мичуринская, д. 112А
Телефон (4752) 63-07-46
E-mail: tipo_tstu68@mail.ru