

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ КОМИТЕТ ПО ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ ВЕЩЕСТВ РАН  
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР РАН  
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Н.Э. БАУМАНА  
МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)  
ГОУ ВПО «ТАМБОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

*Посвящается светлой памяти  
выдающегося ученого-теплофизика  
профессора А.А. Гухмана*

# **ТЕПЛОФИЗИКА В ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИИ И УПРАВЛЕНИИ КАЧЕСТВОМ**

**ШЕСТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКАЯ ШКОЛА**

**1 – 6 октября 2007 года**

**Материалы школы**

**Часть I**



---

Тамбов  
◆ Издательство ТГТУ ◆  
2007

УДК 536.2.08.001.76

ББК ◀311

Т34

Редакционная коллегия:

С.В. Мищенко – *ответственный редактор*,  
С.В. Пономарев – *зам. ответственного редактора*,  
О.С. Дмитриев, П.С. Беляев, В.Н. Чернышов, А.Г. Дивин,  
В.М. Панорядов, В.М. Дмитриев, Д.М. Мордасов,  
Е.П. Постникова, Н.Н. Мочалин

Т34 Теплофизика в энергосбережении и управлении качеством : материалы Шестой международной теплофизической школы : в 2 ч. Тамбов, 1 – 6 окт. 2007 г. / ТГТУ. – Тамбов, 2007. – Ч. 1. – 264 с. – 400 экз. – ISBN 978-5-8265-0614-1.

В сборник включены материалы докладов по следующей тематике: фундаментальные и прикладные проблемы теплофизики, новые методы, приборы и установки для теплофизических исследований.

Предназначен для преподавателей, аспирантов и студентов с целью использования в научной работе и учебной деятельности.

УДК 536.2.08.001.76

ББК ◀311

**Спонсоры** школы: Российский фонд фундаментальных исследований (РФФИ), ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет».

Материалы, вошедшие в сборник, сохраняют авторскую редакцию.

ISBN 978-5-8265-0614-1

© ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет» (ТГТУ), 2007

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Город Тамбов является традиционным местом проведения теплофизических школ, известных широкому кругу ученых России и ближнего зарубежья.

Теплофизические школы являются традиционной формой обмена информацией о последних достижениях в области изучения теплофизических свойств веществ в твердом, жидком и газообразном состояниях; в разработке методов и устройств для исследования теплофизических свойств; способствуют повышению уровня теоретических и экспериментальных теплофизических исследований, внедрению в практику современных методик и измерительных средств.

Первая (1971 г.), вторая (1973 г.), третья (1975 г.), девятая (1988 г.), десятая (1990 г.) Всесоюзные теплофизические школы проводились на базе Тамбовского института химического машиностроения, преобразованного в 1993 г. в Тамбовский государственный технический университет (ТГТУ). В 1977–85 гг. теплофизические школы проводились в Одессе, Алма-Ате и других городах.

Начиная с 1992 г., теплофизическая школа приобрела статус Международной. Первая, Вторая, Третья, Четвертая и Пятая международные теплофизические школы были проведены в г. Тамбове на базе ТГТУ в период с 21 по 24 сентября 1992 г., с 25 по 30 сентября 1995 г., с 19 по 22 октября 1998 г., с 24 по 28 сентября 2001 г. и с 20 по 24 сентября 2004 г.

Шестая международная теплофизическая школа, посвященная фундаментальным и прикладным проблемам теплофизики, новым методам, приборам и установкам для теплофизических исследований, информационно-измерительным системам для научных исследований и проектирования процессов и аппаратов тепло- и массопереноса, метрологии, техническому регулированию и управлению качеством, современным энергосберегающим тепловым технологиям, сушке и термовлажностной обработке материалов, а также проблемам подготовки специалистов по теплофизике, энергосбережению и управлению качеством, будет также проводиться в г. Тамбове с 1 по 6 октября 2007 г. Во время ее работы планируется провести выставку теплофизических приборов и программных средств.

Предлагаемый вашему вниманию сборник материалов содержит результаты современных исследований теплофизических свойств веществ, разработки теплофизических приборов и средств измерений при контроле и управлении качеством, а также результаты исследований в области энергосберегающих технологий, сушке и термовлажностной обработке материалов.

### ОРГКОМИТЕТ МЕЖДУНАРОДНОЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОЙ ШКОЛЫ «ТЕПЛОФИЗИКА В ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИИ И УПРАВЛЕНИИ КАЧЕСТВОМ»

|                         |   |
|-------------------------|---|
| <b>Фортов В.Е.</b>      | сопредседатель оргкомитета, академик РАН, директор ОИВТ РАН (г. Москва)   |
| <b>Мищенко С.В.</b>     | сопредседатель оргкомитета, д-р техн. наук, профессор, ректор Тамбовского государственного технического университета (ТГТУ)   |
| <b>Шейндлин М.А.</b>    | зам. председателя оргкомитета, д-р физ.-мат. наук, зав. отделом ОИВТ РАН (г. Москва)  |
| <b>Пономарев С.В.</b>   | зам. председателя оргкомитета, д-р техн. наук, профессор ТГТУ   |
| <b>Дмитриев О.С.</b>    | зам. председателя оргкомитета, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой ТГТУ  |
| <b>Арутюнов Б.А.</b>    | д-р техн. наук, профессор Московской государственной академии тонкой химической технологии им. М.В. Ломоносова  |
| <b>Басок Б.И.</b>       | член-корреспондент НАНУ, зам. директора института технической теплофизики (г. Киев)   |
| <b>Битюков В.К.</b>     | д-р техн. наук, профессор, декан Московского государственного института радиотехники, электроники и автоматики (МИРЭА – технический университет)                      |
| <b>Бойцов Б.В.</b>      | д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой Московского авиационного института (государственного технического университета), вице-президент Академии проблем качества РФ |
| <b>Ветров В.В.</b>      | д-р техн. наук, профессор, проректор Тульского государственного университета  |
| <b>Горленко О.А.</b>    | д-р техн. наук, профессор, проректор по качеству и инновационной работе Брянского государственного технологического университета                                      |
| <b>Дульнев Г.Н.</b>     | д-р техн. наук, профессор Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики   |
| <b>Жаврин Ю.И.</b>      | д-р физ.-мат. наук, профессор Казахского государственного национального университета им. Аль-Фараби (г. Алматы)   |
| <b>Жуков Н.П.</b>       | д-р техн. наук, профессор, проректор ТГТУ   |
| <b>Карташов Э.М.</b>    | д-р физ.-мат. наук, профессор Московской государственной академии тонкой химической технологии им. М.В. Ломоносова  |
| <b>Кириллин А.В.</b>    | д-р физ.-мат. наук, профессор, начальник управления РФФИ (г. Москва)  |
| <b>Киселев М.И.</b>     | д-р физ.-мат. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана   |
| <b>Коновалов В.И.</b>   | д-р техн. наук, профессор ТГТУ  |
| <b>Коршунов И.Г.</b>    | д-р физ.-мат. наук, профессор Уральской горно-геологической академии (г. Екатеринбург)  |
| <b>Lien Terje K.</b>    | профессор кафедры «Производство и обеспечение качества» Норвежского университета науки и технологий (г. Тронхейм)   |
| <b>Петров В.А.</b>      | д-р техн. наук, профессор МИРЭА (г. Москва)   |
| <b>Печенегов Ю.Я.</b>   | д-р техн. наук, профессор Технологического института Саратовского государственного технического университета (г. Энгельс)   |
| <b>Попов Ю.А.</b>       | д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой Российского государственного геолого-разведочного университета (г. Москва)   |
| <b>Рудобашта С.П.</b>   | д-р техн. наук, профессор Московского государственного агроинженерного университета им. В.П. Горячкина  |
| <b>Сафаров М.М.</b>     | д-р техн. наук, профессор Таджикского технического университета (г. Душанбе)  |
| <b>Свиридов В.Г.</b>    | д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой Московского энергетического института (технического университета)  |
| <b>Sexton Joseph S.</b> | руководитель программы обеспечения качества, Washington Group International (США)   |
| <b>Шашков А.Г.</b>      | академик НАН Беларуси, советник по науке АНК ИТМО им. А.В. Лыкова (г. Минск)  |

# **ПРОГРАММА**

---

---

**Первый день**  
**1 октября 2007 г.**

---

---

ДЕНЬ ЗАЕЗДА УЧАСТНИКОВ

1 Регистрация участников Шестой международной теплофизической школы (9<sup>00</sup> – 18<sup>00</sup>).  
Главный корпус ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет» по адресу: г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, Малый зал.

2 Размещение участников в гостиницах.

**ОБЕД**                      13<sup>00</sup> – 14<sup>00</sup>

3 Экскурсия по городу Тамбову и по Тамбовскому государственному техническому университету.

---

---

**Второй день**  
**2 октября 2007 г.**

---

---

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

*Начало в 10 час.*

1 Открытие конференции.

**Мищенко С.В.** – доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки и техники РФ, академик Инженерной академии наук, ректор Тамбовского государственного технического университета (Тамбов)

2 Методы исследования свойств веществ при экстремально высоких температурах и давлениях.

**Фортов В.Е.** – академик РАН, директор ОИВТ РАН  
Шейндлин М.А. – доктор физико-математических наук, зав. отделом ОИВТ РАН (Москва)

3 Теоретические основы и принципы построения схем исследования термодиффузии.

**Шашков А.Г.** – академик НАН Беларуси, советник по науке АНК ИТМО им. А.В. Лыкова (Минск)

4 Тепловое разрушение.

**Карташов Э.М.** – доктор физико-математических наук, профессор Московской академии тонкой химической технологии им. М.В. Ломоносова (Москва)

5 Термодинамика массоэнергоинформационного обмена.

**Дульнев Г.Н.** – доктор технических наук, профессор Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики

6 Хронометрия – фундамент прикладной метрологии.

**Киселев М.И.** – доктор физико-математических наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва)

7 Аналитический вывод закона Стефана-Больцмана из закона Планка.

**Битюков В.К.** – доктор технических наук, профессор, декан Московского государственного института радиотехники, электроники и автоматики (технический университет) (Москва)  
Худак Ю.И.

8 Фазовые переходы и образование двухфазной зоны в условиях радиационно-кондуктивного теплопереноса.

**Петров В.А.** – доктор технических наук, профессор МИРЭА (г. Москва)

9 Интенсификация теплообмена – как средство энерго- и ресурсосбережения.

**Печенегов Ю.Я.** – доктор технических наук, профессор Технологического института Саратовского государственного технического университета (г. Энгельс)

10 Температура плавления графита.

**Савватимский А.И.** – доктор технических наук ОИВТ РАН (г. Москва)

11 Проблемы гидродинамики и теплообмена жидкометаллических теплоносителей перспективной энергетики.

**Свиридов В.Г.** – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой Московского энергетического института (технического университета)

12 Основной механизм теплообмена при пузырьковом кипении.

**Ягов В.В.** – доктор технических наук, профессор Московского энергетического института (технического университета)

## СЕКЦИЯ 1

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ  
ПРОБЛЕМЫ ТЕПЛОФИЗИКИ*Сопредседатели секции:*

доктор физико-математических наук, профессор

**Шейндлин Михаил Александрович**

доктор физико-математических наук, профессор

**Карташов Эдуард Михайлович***Ученый секретарь*

доктор технических наук, профессор

**Беляев Павел Серафимович***Дневное заседание с 14 до 18 часов***Л е к ц и и**

1 Температурные поля и образование расплава при нагреве оксида алюминия потоком лазерного излучения различной плотности.

**Битюков В.К.**, Макаров Д.Е., Улыбин С.А. (Москва)

2 Особенности исследования теплофизических и кинетических характеристик углепластиков в процессе отверждения.

**Дмитриев О.С.**, Мищенко С.В., Дмитриев С.О.

Херрман А.З., Хоффмейстер К. (Тамбов)

3 Диффузионная неустойчивость трехкомпонентных газовых систем в каналах различной геометрии.

**Жаврин Ю.И.**, Поярков И.В., Федоренко О.В. (Алматы)**Д о к л а д ы**

1 Влияние пористости среды на возникновение неустойчивости механического равновесия трехкомпонентной газовой смеси при диффузии в изотермических условиях.

Анкушева Н.Б., Акылбекова Г., **Косов В.Н.** (Алматы)

2 Верификация коэффициента теплопроводности засоленных стеновых материалов на основе физико-статистического подхода.

Езерский В.А., **Ельчищева Т.Ф.** (Тамбов)

3 Описание многокомпонентной диффузии в двухколбовом аппарате с применением языка программирования Delphi

**Жаврин Ю.И.**, **Поярков И.В.**, Федоренко О.В. (Алматы)

4 К решению проблем качества автомобильных дорог через новые сырьевые компоненты дорожных связующих и прогрессивные технологии их производства.

**Забавников М.В.**, Беляев П.С., Маликов О.Г. (Тамбов)

5 Принципы тепловой дефектоскопии и томографии на основе численного решения коэффициентных задач теплопроводности.

**Ищук И.Н.** (Тамбов)

6 Равновесные и неравновесные теплофизические свойства молекулярно-кластерных смесей газов.

**Курлапов Л.И.** (Алматы)**С т е н д о в ы е д о к л а д ы**

1 Теплофизические характеристики шамотных огнеупорных кирпичей, используемые при футировке электролизеров с обожженными анодами.

**Акрамов М.Б.**, Эрзолов Б.Б. (Душанбе)

2 Математическая модель теплопереноса в процессе регенерации воздуха.

**Балабанов П.В.**, Пономарев С.В. (Тамбов)

3 Неразрушающий контроль влажностеплопроводности монолитных строительных материалов.

**Беляев М.П.** (Тамбов)

4 К вопросу о неразрушающем экспресс-контроле качественных показателей бумаги.

**Беляев М.П.** (Тамбов)

- 5 Теплофизические свойства углеродных нанотрубок.  
Дмитриев С.О., Дмитриев А.О. (Тамбов)
- 6 Удельная изобарная теплоемкость и энтальпии водных растворов этилгидразина.  
Зарипова М.А., Зоиров Х.А., Бадалов А.Б., Сафаров М.М. (Душанбе)
- 7 Теплопроводность и плотность алкилзамещенных водных растворов в зависимости от температуры при атмосферном давлении.  
Зарипова М.А., Тиллоева Т.Р., Тауров Э.Ш., Сафаров М.М. (Душанбе)
- 8 Показатель преломления поверхностного слоя на границе раздела жидкость – пар системы метанол – гептан в окрестности критической температуры.  
Ильина С.Г., Никулин А.В. (Москва)
- 9 К расчету локальных характеристик радиационного и сложного теплообмена в рамках зонального метода.  
Кулешов О.Ю., Седёлкин В.М. (Энгельс)
- 10 Двухфазная математическая модель тепловлагопереноса в выпекаемом тестовом изделии.  
Кулешов О.Ю., Седёлкин В.М. (Энгельс)

## **КРУГЛЫЙ СТОЛ**

*Начало в 19 час.*

---

---

Третий день  
3 октября 2007 г.

---

---

### СЕКЦИЯ 1 ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕПЛОФИЗИКИ

*Утреннее заседание с 10 до 13 часов*

#### **Л е к ц и и**

- 1 Температуропроводность и теплопроводность контактных зон биметаллов, полученных высокоэнергетическим ударным нагружением металлов контактных пар.  
Коршунов И.Г., Уймин А.А. (Екатеринбург)
- 2 Повышение качественных характеристик нефтепродуктов при импульсной энергетической обработке.  
Промтов М.А. (Тамбов)
- 3 Применение гидразина и его водных растворов для предотвращения образования железоокисных отложений и изменение теплопроводности.  
Сафаров М.М., Аминов Ш.А. (Душанбе)

#### **Д о к л а д ы**

- 1 Определение закона движения границы фазового перехода.  
Майникова Н.Ф. (Тамбов)
- 2 Двухфазная зона и скачок коэффициента поглощения при интенсивном нагреве оксида алюминия.  
Макаров Д.Е., Петров В.А., Титов В.Е. (Москва)
- 3 Теплообмен при лобовом натекании на отвод трубчатого змеевика.  
Печенегов Ю.Я., Дубровин М.В. (Энгельс)
- 4 Моделирование и оптимизация подогревателей нефти с рециркуляцией продуктов сгорания топлива.  
Печенегов Ю.Я., Серов Д.Ю., Махунов И.А. (Энгельс)
- 5 Математическое моделирование методов измерения коэффициента диффузии влаги в капиллярно-пористых материалах.  
Пономарев С.В., Мочалин С.Н. (Тамбов)
- 6 Расчетно-экспериментальное исследование термодинамических и теплофизических свойств катализаторов системы (Ni+Al) и (Al+Cu).  
Тауров Э.Ш., Сафаров М.М., Тиллоева Т.Р., Сайдуллаева М.С. (Душанбе)

#### **С т е н д о в ы е д о к л а д ы**

- 1 Плотность фракций газовых конденсатов при различных температурах и давлениях.

- Магомадов А.С., **Мальцев Р.Г.** (Краснодар)
- 2 Обобщенное уравнение плотности фракций газовых конденсатов при различных температурах и давлениях.  
**Мальцев Р.Г.**, Магомадов А.С. (Краснодар)
- 3 Снижение гидравлического сопротивления противоточных циклонов.  
**Матказина А.А.**, Грунин А.Н., Устинов Н.А. (Балаково)
- 4 Исследование температурного коэффициента линейного расширения волновым методом.  
**Микита Г.И.** (Москва)
- 5 Тепло- и электрофизические свойства воды водохранилища Байпазинской гидроэлектростанции.  
**Мухамадиев М.С.**, Бобошеров Д.И., Давлатшоев С.К.,  
Сафаров М.М. (Душанбе)
- 6 Теплофизические свойства рабочей жидкости горных машин в широком интервале параметров состояния.  
**Нажмудинов Ш.З.**, Подерни Р.Ю., Тагоева Н.У.,  
Бобиев С.С., Сафаров М.М. (Душанбе)
- 7 Влияние влажности на изменение плотности и теплопроводности порошков.  
**Пирмадов М.Д.**, Сафаров М.М. (Душанбе)
- 8 Об определении геометрических инвариантов излучения в полости сложного вида с затенением.  
**Савина Ю.В.**, Богатов Е.М. (Старый Оскол)
- 9 Линейные расширение и сжимаемости сплавов системы (Al + Be + PЗМ).  
**Самиев К.А.**, Сафаров М.М., Сафаров А.М., Ганиев И.Н. (Душанбе)
- 10 Методы расчета теплоемкости углеводородов и их производных, основанные на модельных представлениях и методах подобия.  
**Юсупов Ш.Т.**, Тагоев С.А., Зарипова М.А., Сафаров М.М.,  
Нуридинов З. (Душанбе)

**ОБЕД**      13<sup>00</sup> – 14<sup>00</sup>

## СЕКЦИЯ 2

### НОВЫЕ МЕТОДЫ, ПРИБОРЫ И УСТАНОВКИ ДЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

#### *Сопредседатели секции:*

доктор физико-математических наук, профессор  
**Коршунов Игорь Георгиевич,**  
доктор технических наук, профессор  
**Вертоградский Валерий Александрович**

#### *Ученый секретарь*

доктор технических наук, профессор  
**Чернышов Владимир Николаевич**

*Дневное заседание с 14 до 18 часов*

#### Л е к ц и и

- 1 Установки для измерения температуропроводности конденсированных материалов при высоких температурах. Метод температурных волн.  
**Ивлиев А.Д.** (Екатеринбург)
- 2 Комплекс методов для эффективных исследований теплофизических свойств материалов.  
**Вертоградский В.А.** (Москва)
- 3 Устройство для реализации комплекса методов измерения теплофизических характеристик твердых, сыпучих и жидких материалов.  
**Дивин А.Г.**, Ковалев Е.Н. (Тамбов)
- 4 Импульсный теплофизический контроль аварийного смешения жидких сред.  
**Волосников Д.В.**, Скрипов П.В. (Екатеринбург)



## Доклады

- 1 Установка для исследования эффективности работы маслонаполненного трансформатора.  
**Лонцаков О.А.,** Пашанин А.В., Гумеров Ф.М. (Казань)
- 2 Методика высокотемпературных исследований теплофизических свойств керамических материалов аэрокосмического назначения.  
**Анучин С.А.,** Серeda Г.Н., Степанов П.А. (Обнинск)
- 3 Определение условий адекватности модели распределения тепла реальному процессу при теплофизическом контроле.  
**Балашов А.А.,** Жуков Н.П. (Тамбов)
- 4 Метод исследования теплофизических свойств масел в перегретых состояниях.  
Горбатов В.И., Скрипов П.В., **Смотрицкий А.А.** (Екатеринбург)
- 5 Оптимальная по квадратичному критерию идентификация теплофизических свойств материалов.  
Лобанов С.М., **Скрипкин А.С.** (Тамбов)

## Стеновые доклады

- 1 Методы и автоматизированная система неразрушающего контроля комплекса теплофизических свойств.  
**Антонова Л.Л.,** Чуриков А.А. (Тамбов)
- 2 Определение режимных параметров теплофизического эксперимента в зависимости от заданной толщины исследуемого образца.  
**Антонова Л.Л.,** Чуриков А.А. (Тамбов)
- 3 Измерение теплофизических свойств твердых материалов методом регулярного режима 3 рода.  
**Артюхина Е.Л.** (Тамбов)
- 4 Имитационное исследование метода неразрушающего контроля структурных переходов в полимерах.  
**Балашов А.А.,** Сундуков М.С. (Тамбов)
- 5 Метод неразрушающего контроля металлофторопластовых материалов.  
**Банников А.Н.,** Пудовкин А.П., Чернышова Т.И. (Тамбов)
- 6 Измерение плотности в малых объемах жидкости барботажным методом.  
**Баршутина М.Н.,** Мордасов Д.М., Мордасов М.М. (Тамбов)
- 7 О возможности пневмодинамического измерения пористости сыпучего материала.  
Булгаков Н.А., Мордасов Д.М., **Епифанов С.В.** (Тамбов)
- 8 Выбор параметров, контролируемых в процессе рассиропки при производстве спирта из мелассы.  
**Ведешкина Л.А.** (Тамбов)
- 9 Установка для исследования динамики взаимодействия струи газа с вязкой жидкостью.  
**Гребенникова Н.М.** (Тамбов)
- 10 Модель вертикального движения лунки, образованной на поверхности вязкой жидкости.  
**Гребенникова Н.М.,** Вязовов В.Б. (Тамбов)
- 11 Струйный генератор в устройствах контроля плотности сыпучих материалов.  
**Епифанов С.В.,** Мордасов Д.М. (Тамбов)
- 12 Аппаратура для измерения температуропроводности в режиме субсекундного нагрева.  
Заянов Э.Р., Гиниятуллин А.А., Горбатов В.И.,  
**Старостин А.А.,** Попцов М.А., Шангин В.В. (Екатеринбург)
- 13 Микроволновой поляризационный метод измерения влажности и теплопроводности материалов.  
**Котов И.О.,** Чернышов В.Н., Дмитриев Д.А., Федюнин П.А. (Тамбов)
- 14 Анализ решения уравнения теплопроводности на основе подсчета производства энтропии.  
Курлапов Л.И., **Скорняков А.Ю.** (Алматы)
- 15 Моделирование массопереноса для диагностики и контроля качественных характеристик.  
Маковеев С.Н., **Нистратова Е.А.,** Липовских Ю.С. (Тамбов)
- 16 Вектор развития программно-аппаратных комплексов  
**Минин Д.В.,** Швецова Е.Б. (Тамбов)
- 17 Объемметрический пузырьковый метод контроля вязкости жидкостей.  
Мордасов М.М., **Козадаева М.М.** (Тамбов)
- 18 Пневмоэлектрическое устройство для бесконтактного неразрушающего контроля вязкости.  
Мордасов М.М., **Савенков А.П.** (Тамбов)

- 19 Метод и измерительная система контроля качества материалов радиоэлектронной техники.  
**Пудовкин А.П.**, Москвитин С.П., Кольтюков Н.А. (Тамбов)
- 20 Экспериментальная установка для исследования скорости звука в чистых жидкостях и растворах в широком диапазоне параметров состояния.  
**Самуйлов В.С.** (Могилев)
- 21 Учет неравномерного начального распределения температуры в задачах неразрушающего теплофизического контроля образцов.  
**Сенкевич А.Ю.** (Тамбов)
- 22 Правила проектирования компьютерных анализаторов.  
**Серегин М.Ю.**, Тамбовский Д.М. (Тамбов)
- 23 Портативные аналитические приборы на основе карманных персональных компьютеров.  
**Серегин М.Ю.**, Тамбовский Д.М. (Тамбов)
- 24 Метод бесконтактного неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов.  
Сысоев Э.В., **Чернышов А.В.** (Тамбов)
- 25 Автоматизированная лазерная установка для определения локальных теплофизических характеристик неоднородных материалов.  
**Уймин А.А.**, Низамутдинов Д.Ф. (Екатеринбург)
- 26 Комбинированный метод неразрушающего контроля теплофизических свойств трехслойных изделий.  
Чернышов В.Н., **Иванов Г.Н.**, Чернышов А.В. (Тамбов)
- 27 Метрологическая надежность средств теплофизических измерений с учетом влажности окружающей среды.  
Чернышова Т.И., **Нистратов М.И.** (Тамбов)
- 28 Выбор оптимальных параметров теплофизического эксперимента.  
Чуриков А.А., **Шишкина Г.В.** (Тамбов)
- 29 Устройство экспресс-контроля летучих примесей в маслах.  
**Шангин В.В.**, Смотрицкий А.А., Волосников Д.В., Старостин А.А. (Екатеринбург)
- 30 Система тепловой защиты в измерительном устройстве для исследования теплофизических свойств дисперсных материалов.  
**Шишкина Г.В.** (Тамбов)
- 31 Бинарное моделирование и включаемость информационно-измерительных систем.  
Муромцев Ю.Л., Гребенников Р.В., **Малев П.В.** (Тамбов)

## **КУЛЬТУРНАЯ ПРОГРАММА**

---

---

**Четвертый день  
4 октября 2007 г.**

---

---

### **СЕКЦИЯ 3**

#### **ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА**

*Сопредседатели секции:*

доктор технических наук, профессор  
**Дмитриев Олег Сергеевич**  
доктор технических наук, профессор  
**Жуков Николай Павлович**

*Ученый секретарь*

кандидат технических наук, доцент  
**Дивин Александр Георгиевич**

*Утреннее заседание с 10 до 13 часов*

#### **Лекции**

- 1 Информационно-измерительная система для определения теплофизических характеристик полимерных материалов.  
**Дивин А.Г.**, Пономарев С.В., Баронин Г.С., Смолин А.М., Ткачев А.Г., Завражин Д.О., Мозгова Г.В. (Тамбов)
- 2 Применение информационно-измерительных систем в исследованиях теплообмена при конденсации бинарных смесей паров.

Лонцаков О.А., Шарафеев Р.Ф., Гумеров Ф.М. (Казань)

3 Средство технического контроля качества тепловой защиты аэрокосмических аппаратов.

Чудинов Ю.В., Ищук И.Н., Фесенко А.И. (Тамбов)

### Д о к л а д ы

1 Метод неразрушающего контроля структурных превращений в полимерах.

Никулин С.С., Бородавкин Д.Г., Сундуков М.С.,  
Майникова Н.Ф. (Тамбов)

2 Оценка адекватности модели распространения тепла от линейного нагревателя реальному тепловому процессу.

Чех А.С., Рогов И.В., Жуков Н.П. (Тамбов)

3 Интегрированная информационно-измерительная система исследования свойств полимерных композитов в процессе отверждения.

Дмитриев А.О., Дмитриев С.О. (Тамбов)

### С т е н д о в ы е д о к л а д ы

1 Разработка информационных моделей температурных полей при вулканизации резинотехнических изделий.

Завьялов А.В. (Тамбов)

2 Информационное обеспечение подсистемы синтеза текста при автоматизированном проектировании технологических объектов.

Коробова И.Л., Дьяков И.А. (Тамбов)

3 Измерительная система неразрушающего теплофизического контроля.

Никулин С.С., Бородавкин Д.Г., Рогов И.В. (Тамбов)

4 Информационная модель стратегического партнерства при разработке и эксплуатации информационно-измерительных систем контроля свойств материалов.

Селиванова З.М., Ибрагим Ияд Ахмад (Тамбов)

5 Задача выбора метода контроля свойств материалов в интеллектуальных информационно-измерительных системах.

Селиванова З.М., Самохвалов А.А., Князев В.А.,  
Хоруб Хазем Халед (Тамбов)

**О Б Е Д**      13<sup>00</sup> – 14<sup>00</sup>

### С Е К Ц И Я 4

#### МЕТРОЛОГИЯ, ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

*Сопредседатели секции:*

доктор физико-математических наук, профессор

**Киселев Михаил Иванович**

доктор технических наук, профессор

**Битюков Владимир Ксенофонович**

*Ученый секретарь*

кандидат технических наук, доцент

**Панорядов Виктор Михайлович**

*Дневное заседание с 14 до 18 часов*

### Л е к ц и и

1 Графоаналитический метод определения терморежимов сушки зерна высокой влажности в плотном неподвижном и гравитационно перемещаемом слоях.

Авдеев А.В., Начинов Д.С., Авдеева А.А. (Москва)

2 Подход к реализации решений, направленных на улучшение.

Мищенко С.В., **Злобин Э.В.**, Кирисов С.В. (Тамбов)

3 Исследование нагрева газойля и  $\alpha$ -олифеинов в роторном импульсном аппарате.

**Промтов М.А.**, Авсеев А.С. (Тамбов)

### Устные доклады

1 Мониторинг во внутривузовской системе менеджмента качества.

Битюков В.К., **Сидорин В.В.** (Москва)

2 Внутривузовская система менеджмента качества на основе информационных компьютерных технологий.

**Сидорин А.В.** (Москва)

3 Всеобщее обслуживание оборудования при внедрении бережливого производства в действующую систему менеджмента качества.

**Антипов Д.В.**, Хмелькова О.И. (Тольятти)

4 Управление качеством процессов на основе метрики «б сигм».

Щипанов В.В., **Чернова Ю.К.** (Тольятти)

5 Алгоритм интроскопии и идентификации неоднородностей покрытий на металле микроволновым методом поверхностных волн.

**Панов А.А.**, Казьмин А.И., Федюнин П.А. (Тамбов)

6 Фазорный метод измерения комплексной диэлектрической проницаемости капиллярно-пористых материалов.

**Котов И.О.**, Дмитриев Д.А., Чернышов В.Н. (Тамбов)

7 Программно-аппаратный комплекс для управления свойствами выращиваемых кристаллов методом ОТФ.

**Гоник М.М.**, Боевкин В.И., Гоник М.А. (Москва)

### Стендовые доклады

1 Изучение характера изменения дисперсности аэрозоля, используемого в пламенной фотометрии.

**Барсуков В.И.**, Емельянов А.А., Барсуков Д.Ю. (Тамбов)

2 Повышение качества дорожного покрытия при применении серобитумного вяжущего.

**Волков Д.С.**, Беляев В.П., Забавников М.В. (Тамбов)

3 Оптимизация моделей метрологических средств.

**Голощанов А.А.** (Тамбов)

4 Мероприятия по управлению организационными изменениями.

Злобин Э.В., **Кирисов С.В.** (Тамбов)

5 Экономическая эффективность использования волнового метода контроля температурного коэффициента линейного расширения материалов.

**Микита Г.И.**, Гусев Д.А. (Москва)

6 Температурная коррекция интегральных тензопреобразователей.

**Озаренко А.В.**, Брусенцов Ю.А. (Тамбов)

7 Валково-шнековая технология вторичной переработки термопластов с заданным качеством.

**Полушкин Д.Л.**, Клинков А.С., Соколов М.В., Шашков И.В. (Тамбов)

8 Повышение качества дорожного битума путем его модификации отходами полимерной тары и упаковки.

**Потапов Е.С.**, Беляев В.П., Маликов О.Г. (Тамбов)

9 Расчет оборудования для экструзии резинотехнических изделий заданного качества.

Соколов М.В., Клинков А.С., Беляев П.С., **Туляков Д.В.** (Тамбов)

10 Формирование подсистемы измерения удовлетворенности преподавателей и их вовлеченности в процессы системы менеджмента качества образовательной организации.

**Соколова Л.И.** (Тамбов)

11 Методика проведения и оценки результативности процесса «Внутренний аудит» машиностроительного предприятия.

Трофимов А.В., **Пекина С.С.** (Тамбов)

12 Программно-аппаратный комплекс врача-педиатра с функцией автоматизации измерения антропометрических данных.

---

---

## КУЛЬТУРНАЯ ПРОГРАММА

---

---

Пятый день  
5 октября 2007 г.

---

---

### СЕКЦИЯ 5

#### СОВРЕМЕННЫЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕПЛОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, СУШКА И ТЕРМОВЛАЖНОСТНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

*Сопредседатели секции:*

доктор технических наук, профессор  
**Рудобашта Станислав Павлович**  
доктор технических наук, профессор  
**Коновалов Виктор Иванович**

*Ученый секретарь*

доктор технических наук, профессор  
**Дмитриев Вячеслав Михайлович**

*Утреннее заседание с 10 до 13 часов*

#### Лекции

- 1 Энергосберегающая технология производства крупногабаритных изделий из полимерных композиционных материалов.  
**Дмитриев О.С., Мищенко С.В., Дмитриев А.О., Кириллов В.Н. (Тамбов)**
- 2 Термоимпульсное формование полимерных композиционных материалов.  
**Малков И.В., Лосев А.В. (Луганск)**
- 3 Вопросы повышения эффективности систем геотермального теплоснабжения на основе комбинированного регулирования отпуска тепла.  
**Джаватов Д.К. (Махачкала)**

#### Устные доклады

- 1 Алгоритм оперативного решения задачи оптимального энергосберегающего управления комплексом электропечей.  
**Муромцев Ю.Л., Мачихин А.И. (Тамбов)**
- 2 Измерительно-вычислительный комплекс измерения влажности капиллярно-пористых материалов.  
**Дмитриев С.А., Федюнин П.А., Дмитриев Д.А. (Тамбов)**
- 3 Микроволновой контроль влажности капиллярно-пористых материалов.  
**Дмитриев С.А., Федюнин П.А., Дмитриев Д.А. (Тамбов)**

#### Стендовые доклады

- 1 Модель динамических режимов многосекционной сушильной установки и ее реализация в системе энергосберегающего управления.  
**Артемова С.В., Грибков А.Н., Ерышов А.Е. (Тамбов)**
- 2 Структурно-механические и молекулярно-релаксационные характеристики полимерных композитов, полученных энергосберегающей твердофазной технологией.  
**Баронин Г.С., Столин А.М., Завражин Д.О., Канищева Ю.В., Пугачев Д.В., Шапкин К.В. (Тамбов)**

- 3 Сушка древесины при помощи магнитного поля крайне низкочастотного диапазона.  
**Барышев М.Г.**, Джимаков С.С., Куликова Н.Н. (Краснодар)
- 4 Математическое моделирование пылевоздушных потоков при пуске теплоэнергетического оборудования.  
**Богданов А.Н.** (Казань)
- 5 Исследование влияния легирующих ингредиентов на свойства полимерных композитов.  
**Дмитриев В.М.**, Баронин Г.С., Ткачев А.Г., Иванов С.А., Крутов А.Ю., Кобзев Д.Е., Завражин Д.О. (Тамбов)
- 6 Математическое моделирование пусковых режимов энергетических установок.  
**Марфина О.П.** (Казань)
- 7 Математическая модель экспрессного метода измерения коэффициента диффузии влаги в капиллярно-пористых материалах.  
**Мочалин С.Н.** (Тамбов)
- 8 Энергосберегающее управление многомерными объектами.  
Муромцев Д.Ю., **Гребенников Р.В.** (Тамбов)
- 9 Исследование теплоизоляционных характеристик зданий.  
Ртищева А.С., **Артюхин К.И.** (Ульяновск)
- 10 Энерго- и ресурсосбережение в узле контактирования при производстве монометиланилина.  
**Филатова Е.Ю.**, Туголуков Е.Н. (Тамбов)
- 11 Расчет технологических и конструктивных параметров двухшнековых смесителей при минимальных энергозатратах.  
**Хрушев С.П.**, Клинков А.С., Соколов М.В. (Тамбов)

**ОБЕД**      13<sup>00</sup> – 14<sup>00</sup>

## СЕКЦИЯ 6

### ПРОБЛЕМЫ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО ТЕПЛОФИЗИКЕ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЮ И УПРАВЛЕНИЮ КАЧЕСТВОМ

*Сопредседатели секции:*

доктор технических наук, профессор  
**Фролов Сергей Владимирович**  
доктор технических наук, профессор  
**Глинкин Евгений Иванович**

*Ученый секретарь*

доктор технических наук, доцент  
**Мордасов Денис Михайлович**

*Дневное заседание с 14 до 18 часов*

### Л е к ц и и

- 1 Практический подход к построению экспериментальной шкалы для измерения потенциала влагопереноса в капиллярно-пористых материалах.  
**Пономарев С.В.**, Мищенко С.В. (Тамбов)
- 2 Участие студентов в инновационных проектах – основа повышения качества образовательного процесса.  
Фролова М.С., **Фролов С.В.**, Лоскутов С.А., Бакулина В.С., Быкова О.А. (Тамбов)
- 3 Модели вольтамперных характеристик при подготовке специалистов по аналитическому контролю.  
Матвеева Т.В., **Глинкин Е.И.** (Тамбов)

### У с т н ы е д о к л а д ы

- 1 Процессный и системный подходы в организации практики студентов.  
**Панорядов В.М.** (Тамбов)

- 2 Математическая модель логического устройства при изучении архитектуры теплофизических систем.  
**Глинкин М.Е., Глинкин Е.И.** (Тамбов)

### **Стеновые доклады**

- 1 Развитие теории теплового излучения Максвеллом Планком.  
**Бурова Н.Д., Кудрявцев С.П.** (Тамбов)
- 2 Новые технологии создания электронных учебных пособий.  
**Денисов Н.В., Уваров А.М.** (Тамбов)
- 3 Разработка информационной системы обучения работе на прессах вулканизации.  
**Завьялов А.В.** (Тамбов)
- 4 Применение генераторов в теплофизике.  
**Кольцова Л.Н.** (Тамбов)
- 5 Роль Дж. Дж. Томсона в развитии физики, метрологии и стандартизации.  
**Кудрявцев С.П., Переславцев И.С.** (Тамбов)
- 6 Новый оригинальный метод получения и изучения температурных зависимостей с помощью персонального компьютера.  
**Поликарпов В.М., Быстрицкий В.С., Головин Ю.М., Холодилин В.Н.** (Тамбов)
- 7 Сопоставительный анализ способов аналитического контроля давления.  
**Соколова Т.С., Иванова Л.Ю.** (Тамбов)
- 8 Повышение качества измерения теплофизических свойств при модернизации микроскопа.  
**Талалаева Е.Г., Тарамышева С.А.** (Тамбов)
- 9 Методическое пособие «Измерение давления».  
**Чернякова А.А., Пьяных А.Е.** (Тамбов)

## ***КУЛЬТУРНАЯ ПРОГРАММА***

---

---

**Шестой день  
6 октября 2007 г.**

---

---

### **ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНОЕ ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ**

***Начало в 10 часов***

- 1 Информация о результатах работы секций.  
**Председатели секций**
- 2 Обсуждение результатов работы школы и принятие рекомендаций о перспективных направлениях теплофизических исследований.  
**Сопредседатель оргкомитета, д-р техн. наук, профессор Мищенко С.В.**

***Круглые столы секций***

## **ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ**



**АНАЛИТИЧЕСКИЙ ВЫВОД  
ЗАКОНА СТЕФАНА-БОЛЬЦМАНА ИЗ ЗАКОНА ПЛАНКА**

Известно [1 – 11], что плотность потока спектрального (монохроматического) излучения  $E_v^0(T)$  абсолютно черного тела (АЧТ) в среду с показателем преломления  $n = 1$  (например, вакуум или воздух) в полусфере определяется законом Планка:

$$E_v^0(T) = \frac{2h\nu^3}{c_0^2 [\exp(h\nu/kT) - 1]}, \text{ Вт/м}^3, \quad (1)$$

где  $\nu$  – частота;  $T$  – температура;  $h$  – постоянная Планка;  $k$  – постоянная Больцмана;  $c_0$  – скорость света в вакууме.

Во многих практических приложениях, например, пирометрии, при определении плотности потока спектрального излучения вместо частоты  $\nu$  используется длина волны  $\lambda$ . В этом случае плотность потока спектрального излучения  $E_\lambda^0(T)$  АЧТ в среду с показателем преломления, равным 1, в полусферу определяется законом Планка, записанным в следующем виде:

$$E_\lambda^0(T) = \frac{c_1}{\lambda^5 (\exp(c_2/(\lambda T)) - 1)}, \text{ Вт/м}^3, \quad (2)$$

где  $c_1 = 3,7413 \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$  – первая постоянная Планка;  $c_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$  – вторая постоянная Планка.

Если излучение происходит в среду, имеющую показатель преломления  $n$ , то в формуле (1) следует заменить  $c_0$  на  $c/n$ , а в формуле (2) – длину волны  $\lambda$  на  $\lambda/n$ .

Плотность интегрального потока излучения  $E_t^0$  АЧТ, излучающего в полусферу в среду с показателем преломления  $n = 1$ , определяется законом Стефана-Больцмана

$$E_t^0 = \sigma T^4, \text{ Вт/м}^2, \quad (3)$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана, равная  $(5,6687 \pm 0,0010) \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ .

Выражение (3) представляет собой интеграл плотности потока спектрального излучения  $E_\lambda^0(T)$  (уравнение (2)) по всем длинам волн электромагнитного излучения (от 0 до  $\infty$ ). Тогда можно записать

$$E_t^0 = \int_0^\infty E_\lambda^0(T) d\lambda = \sigma T^4. \quad (4)$$

К сожалению, как в научной [3 – 8], так и учебной [9 – 11] литературе практически отсутствует аналитический вывод соотношения (4). Причем во многих литературных источниках содержатся лишь фрагментарные указания по данному вопросу, сопровождаемые либо неточностями, либо полиграфическими опечатками. По этой причине имеет смысл представить строгий аналитический вывод закона Стефана-Больцмана из закона Планка.

Таким образом, для решения поставленной задачи необходимо выполнить интегрирование выражения (2), т.е. вычислить интеграл в правой части выражения

$$E_t^0(T) = \int_0^\infty \frac{c_1}{\lambda^5 (\exp(c_2/(\lambda T)) - 1)} d\lambda. \quad (5)$$

С математической точки зрения необходимо убедиться, что выражение (5) имеет смысл, то есть убедиться, что несобственный интеграл в (5) и при  $\lambda = 0$  и при  $\lambda = +\infty$  сходится.

Для удобства выполнения этой процедуры целесообразно провести замену переменной, приняв  $x = \frac{c_2}{\lambda T}$ . Тогда можно записать, что  $\lambda = \frac{c_2}{xT}$  и  $d\lambda = \frac{c_2}{T} \left( -\frac{1}{x^2} \right) dx$ , а пределы интегрирования  $\lambda = 0$  и  $\lambda = +\infty$  превращаются в  $x = +\infty$  и  $x = 0$ , соответственно.

Выполнив замену переменной в интеграле (5), можно записать

$$E_t^0(T) = c_1 \int_0^{+\infty} \frac{\left( \frac{T}{c_2} \right)^5 x^5 \left( \frac{c_2}{T} \right) \left( -\frac{1}{x^2} \right)}{\exp x - 1} dx = c_1 \left( \frac{T}{c_2} \right)^4 \int_0^{+\infty} \frac{x^3}{\exp x - 1} dx. \quad (6)$$

Сходимость полученного интеграла в (6) при  $x \rightarrow +\infty$  очевидна, так в этом случае подынтегральная функция имеет по-

рядок  $x^3 \cdot e^{-x}$  и стремится к нулю быстрее любой степени  $\left(\frac{1}{x}\right)$ .

Для обоснования сходимости несобственного интеграла в выражении (6) при  $x \rightarrow 0+$  и его последующего вычисления полезно воспользоваться определением несобственного интеграла при  $x \rightarrow 0+$ .

$$\int_0^{+\infty} \frac{x^3}{\exp x - 1} dx = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0+} \int_{\varepsilon}^{+\infty} \frac{x^3}{\exp x - 1} dx = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0+} \left[ \int_{\varepsilon}^{+\infty} \frac{x^3 \exp(-x)}{1 - \exp(-x)} dx \right]. \quad (7)$$

Учитывая, что при  $0 < \varepsilon \leq x$  имеет место неравенство  $\exp(-x) \leq \exp(-\varepsilon) = q < 1$ , в последнем из интегралов в формуле (7) подынтегральную функцию можно разложить по формуле геометрической прогрессии в равномерно по  $x$  на интервале  $[\varepsilon, +\infty)$  сходящийся ряд. Это приведет (7) к эквивалентному виду:

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0+} \int_{\varepsilon}^{+\infty} x^3 \left( \sum_{n=0}^{\infty} \exp(-(n+1)x) \right) dx. \quad (8)$$

Благодаря равномерной сходимости ряда под интегралом в выражении (8), этот ряд можно проинтегрировать почленно, что позволяет преобразовать выражение (8) к виду

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0+} \left( \sum_{n=0}^{\infty} \left( \int_{\varepsilon}^{+\infty} x^3 \exp(-(n+1)x) dx \right) \right). \quad (9)$$

В серии получившихся интегралов целесообразно сделать замену переменной по формуле  $(n+1)x = t$ . Благодаря этому можно записать, что при  $x = \varepsilon$   $t = (n+1)\varepsilon$ , а при  $x = +\infty$   $t = +\infty$ . Очевидно также, что  $dx = \frac{1}{n+1} dt$ .

С использованием новой переменной выражение (9) примет вид

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0+} \left( \sum_{n=0}^{\infty} \left( \int_{(n+1)\varepsilon}^{+\infty} \frac{1}{(n+1)^3} t^3 \frac{1}{n+1} \exp(-t) dt \right) \right). \quad (10)$$

После очевидных преобразований можно записать выражение (10) в виде

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0+} \left( \sum_{n=0}^{\infty} \left( \frac{1}{(n+1)^4} \int_{(n+1)\varepsilon}^{+\infty} t^3 \exp(-t) dt \right) \right). \quad (11)$$

В полученном выражении (11) ряд равномерно по  $\varepsilon$  (на интервале изменения  $\varepsilon$   $[0, 1]$ ) сходится по признаку Дирихле-Абея, т.е. числовой ряд

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(n+1)^4} \quad (12)$$

сходится, а численное значение всех интегралов

$$\int_{(n+1)\varepsilon}^{+\infty} t^3 \exp(-t) dt \quad (13)$$

равномерно ограничено величиной

$$\Gamma(4)=3! \quad (14)$$

Благодаря названной равномерной сходимости ряда в выражении (11) можно перейти к пределу под знаком суммы ряда. Тогда выражение (11) трансформируется в соотношение

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(n+1)^4} \left( \lim_{\varepsilon \rightarrow 0+} \int_{(n+1)\varepsilon}^{+\infty} t^3 \exp(-t) dt \right) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(n+1)^4} \cdot 3! \quad (15)$$

Учитывая, что  $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(n+1)^4} = \frac{\pi^4}{90}$ , выражение (6) можно привести к виду

$$E_t^0(T) = c_1 \left( \frac{T}{c_2} \right)^4 \frac{\pi^4}{15} = c_1 \frac{1}{c_2^4} \frac{\pi^4}{15} T^4 = \sigma T^4, \quad (16)$$

$$\text{где } \sigma = c_1 \frac{1}{c_2^4} \frac{\pi^4}{15}.$$

Таким образом, на основании закона Планка аналитически получен закон Стефана-Больцмана.

#### Список литературы

- 1 Шепф, Х.-Г. От Кирхгофа до Планка / Х.-Г. Шепф; пер. с нем. под ред. Д.Н. Зубарева. – М. : Мир, 1981. – 192 с.
- 2 Планк, М. Теория теплового излучения / М. Планк – М. : Гостехтеоретиздат, 1935.
- 3 Спэрроу, Э.М. Теплообмен излучением / Э.М. Спэрроу, Р.Д. Сесс ; пер. с англ. под ред. А.Г. Блоха. – Л. : Энергия, 1971. – 294 с.
- 4 Излучательные свойства твердых материалов / Л.Н. Латыев, В.А. Петров, В.Я. Чеховской, Е.Н. Шестаков ; под общей ред. А.Е. Шейндлина. – М. : Энергия, 1974. – 472 с.
- 5 Зигель, Р. Теплообмен излучением / Р. Зигель, Дж. Хауэлл – М. : Мир, 1975. – 934 с.
- 6 Оцисик, М.Н. Сложный теплообмен / М.Н. Оцисик ; пер. с англ. под ред. Н.А. Анфимова. – М. : Мир, 1976. – 616 с.
- 7 Температурные измерения : справочник / О.А. Герашенко, А.Н. Гордов, А.К. Еремина и др. – Киев : Наукова Думка, 1989. – 704 с.
- 8 Блох, А.Г. Теплообмен излучением / А.Г. Блох, Ю.А. Журавлев, Л.Н. Рыжков – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 432 с.
- 9 Савельев, И.В. Курс общей физики : учебное пособие. В 3 т. Т. 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц / И.В. Савельев – 3-е изд. испр. – М. : Наука, 1987. – 320 с.
- 10 Мирошников, М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов : учебное пособие / М.М. Мирошников – Л. : Машиностроение, 1983. – 696 с.
- 11 Битюков, В. К. Методы и средства бесконтактного контроля теплового состояния изделий : учебное пособие / В.К. Битюков, В.А. Петров – М. : МИРЭА, 1999. – 96 с.

#### *Э.М. Карташов*

Московская государственная академия тонкой химической технологии им. М.В. Ломоносова (МИТХТ)

#### ТЕПЛОВОЕ РАЗРУШЕНИЕ

Тепловое разрушение твердых хрупких полимеров в терминах кинетической термофлуктуационной концепции – до настоящего времени открытый вопрос физики прочности твердых тел. Это можно объяснить, прежде всего, сложностью указанной проблемы, необходимостью привлечения для ее решения ряда самостоятельных научных направлений и согласования ряда самостоятельных научных результатов в рамках обобщенной модели, позволяющей описать термокинетику разрушения как при чисто тепловом нагружении, так и совместно с механическими нагрузками.

Многочисленные эксперименты показали, что в случае теплового нагружения полимерных образцов типа пластины с внутренней (или поверхностной) трещиной тепловым потоком, лежащим в плоскости симметрии образца и направленным перпендикулярно трещине, а также образцов цилиндрического типа с внутренней круговой дискообразной трещиной тепловым потоком вдоль оси симметрии образца по нормали к трещине наблюдается рост трещины и разрушение образцов. Для изучения этого явления и установления его основных закономерностей необходимо привлечь и объединить в рамках обобщенной модели следующие научные направления – подходы:

- **структурно-кинетический** (на основе физики полимеров и молекулярной физики): термофлуктуационная теория для описания элементарного акта разрушения, что связано с выводом конкретного выражения формулы скорости роста трещины как функции текущей длины трещины, поля термических (и механических) напряжений в окрестности вершины трещины (локальные напряжения, активирующие разрыв напряженных химических и межмолекулярных связей во флуктуационном объеме), температуры в вершине трещины и молекулярных констант, характеризующих структуру полимера и элементарные акты разрыва связей; к этому следует добавить необходимость проведения исследований (в рамках структурно-кинетического подхода) по проблеме температурной стабильности термофлуктуационного механизма разрушения полимерных волокон для выяснения характера механизма разрушения (хрупкий, квазихрупкий, нехрупкий); для полимерных пленок такие исследования проведены, и показано, что в широком интервале температур, включающем температуру хрупкости, сказывается влияние температуры на релаксационные и реологические свойства материалов, что в свою очередь оказывает влияние на характер и механизмы разрушения; подобные исследования для полимерных волокон имеют большое значение для расчета молекулярных констант элементарного акта разрушения и правомерности применения феноменологических методов для изучения реакции материала на внешние воздействия;

- **термомеханический** – методы механики хрупкого разрушения (математическая теория трещин) для описания термонапряженного состояния в вершине трещин прямолинейных – в форме разреза (в полимерных пластинах) и круговых – дискообразных (в полимерных волокнах), что позволит рассчитать такие важные характеристики разрушения, как локальное напряжение, коэффициент концентрации напряжений, механический аналог при чисто тепловом нагружении и др.;

- **термодинамический** – для расчета величины безопасного напряжения и установления связи между его величиной и порогом разрушения Гриффита;

- **аналитической теории теплопроводности твердых тел (теплофизика)** для расчета температуры в вершине трещины и ее значений на берегах трещины путем решения краевых задач для уравнения Лапласа с разнородными граничными условиями на линиях на плоскости и в пространстве;

• **методов математической физики** для развития специального математического аппарата, включающего дуальные интегральные уравнения, комплексные потенциалы Мухелишвили – Колосова, метод перевала, спектральные задачи для построения специальных интегральных преобразований, асимптотические методы для количественных оценок сложных интегральных соотношений.

Таким образом, возникает достаточно сложная в прикладном и научном отношениях проблема: теоретическое исследование термокинетики процесса теплового разрушения полимерных пленок (и волокон) с позиций кинетической термофлуктуационной концепции с тем, чтобы с достаточным основанием получить теоретически обоснованные уравнения и новые методы расчета, позволяющие описать рост трещины разрушения, вычислить соответствующую долговечность (время жизни образца), а также основные параметры и предельные характеристики процесса теплового разрушения (в первую очередь безопасные и критические тепловые нагрузки), зависящие от вида тепловой нагрузки, физико-механических и теплофизических характеристик материала, его структуры. Эти результаты могут быть использованы для разработки способов локализации, интенсификации и управления кинетикой трещинообразования роста трещин под действием интенсивных тепловых нагрузок.

#### Список литературы

- 1 Карташов, Э.М. Структурно-статистическая кинетика разрушения полимеров / Э.М. Карташов, Б. Цой, В.В. Шевелев – М. : Химия, 2002. – 740 с.
- 2 Карташов, Э.М. Современные представления кинетической термофлуктуационной теории прочности полимеров (обзор) / Э.М. Карташов // Итоги науки и техники. Сер. Химия и технология ВМС. ВИНТИ. – 1991. – Т. 27. – С. 3 – 112.
- 3 Мухелишвили, Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н.И. Мухелишвили – М. : Наука, 1966. – 707 с.
- 4 Карташов, Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел / Э.М. Карташов – М. : Высшая школа, 2001. – 540 с.
- 5 Карташов Э.М. Энергетическая проблема Гриффита для хрупких полимеров / Э.М. Карташов // Инженерно-физический журнал. – 2007. – Т. 80, № 1. – С. 156–165.

*М.И. Киселев*

Московский государственный технический  
университет им. Н.Э. Баумана

### **ХРОНОМЕТРИЯ – ФУНДАМЕНТ ПРИКЛАДНОЙ МЕТРОЛОГИИ**

Промышленное освоение «движущей силы огня» (Сади Карно, 1736–1832) ознаменовало наступление «века пара», когда практика создания тепловых машин и теория их совершенствования открыли новые горизонты науки, предопределили качественный скачок роста производительных сил.

Постижение закономерностей совершения полезной работы за счет отбора тепла от высокотемпературного (по отношению к внешней среде) сжимаемого рабочего тела продвинуло фундаментальную науку не менее, чем тепловая машина технику, промышленное производство. При этом было достигнуто не только более углубленное понимание закона сохранения энергии, представленного в форме первого начала термодинамики, но и установлены закономерности проявления необратимости реальных физических процессов, что привело к открытию второго начала термодинамики и появлению в науке новой физической величины – энтропии. Здесь следует отметить и многолетнюю полемику по поводу «тепловой смерти Вселенной», закончившуюся ее опровержением [1], и возникновение понятия об информации и теории информации с ее приложениями как в теории связи [2, 3], так и в измерительной технике и метрологии [4, 5].

При этом весьма чутким индикатором борьбы мнений и кипения страстей была проходившая в течение 40 – 60-х годов прошлого века эволюция понятия «машина», претерпевавшего многочисленные вариации под напором как механистических тенденций, так и откровенного догматизма и конъюнктуры, включая гонения на кибернетику.

Развитие аналитической механики с характерными для нее изяществом и мощью математического аппарата вселяло на первых порах уверенность в несокрушимости ньютоновского детерминизма. Однако уже механика многих тел и систем со многими степенями свободы показали принципиальную ограниченность классических подходов в духе детерминизма.

В то же время набиравший силу благодаря своей универсальности аппарат классической термодинамики представлялся весьма перспективным для решения многих фундаментальных проблем и прикладных задач. Поэтому установление связи между аппаратом термодинамики и аналитической механики представлялось весьма интересным еще в самом начале прошлого века. Любопытная попытка такого рода была предпринята в 1918 г. С.А. Богуславским [6]. При этом автор одновременно уделил внимание и трактовке явлений квантовой физики, делавшей тогда первые шаги. Свое исходное положение С.А. Богуславский формулирует в виде утверждения: «В природе осуществляются не все движения, удовлетворяющие дифференциальным уравнениям механики». Однако автор надеется, «что есть путь, на котором можно искать решение проблемы термодинамики и квантов, не выходя из рамок классической механики и не внося в нее ничего существенно нового и чуждого ей». С.А. Богуславский полагал: «Механическую сущность необратимого процесса можно характеризовать как тенденцию молекулярных движений переходить из форм менее устойчивых в формы более устойчивые».

Для реализации своей программы С.А. Богуславский построил функции аналитической механики, соответствующие термодинамическим функциям. Для периодических движений аналогом свободной энергии оказывается среднее значение по времени функции Лагранжа, а произведение энтропии на температуру соответствует удвоенной средней кинетической энер-

гии. При этом, например, энтропия твердого тела, совершающего движение вокруг неподвижной точки, обратно пропорциональна частоте его вращения или прямо пропорциональна его моменту количества движения. Аналогично энтропия осциллятора прямо пропорциональна его периоду.

Данное рассмотрение, лежащее в русле идей Больцмана, Гельмгольца, Герца, не получило дальнейшего развития, поскольку результаты опытов Девисона и Джермера, выполненных спустя несколько лет (1927 г.), показали, что природа гораздо сложнее, имеет место корпускулярно-волновой дуализм и к классической механике нет возврата.

Известное соотношение Гейзенберга

$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar \quad (1)$$

означает, в частности, что состояние ни частицы, ни системы в целом отображается не в точку фазового пространства, а на область малых, но конечных размеров  $(\hbar)^n$ , где  $n$  – размерность пространства.

Приводимое зачастую соотношение

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar, \quad (2)$$

где  $\Delta E$  – неопределенность энергии;  $\Delta t$  – времени, создает впечатление о том, что момента строгого выполнения закона сохранения энергии ( $\Delta E = 0$ ) необходимо ждать бесконечно долго ( $\Delta t = \infty$ ). Более тщательный анализ, проведенный Ю.И. Воронцовым, показал, что это соотношение не имеет фундаментального характера и преодолимо [7].

Тем не менее сама связь фундаментальных физических величин энергия-время глубоко заложена в законах природы и проявляется в определенных условиях. Так в теории измерений соотношение быстродействие-точность отражает и превышает над тепловым шумовым фоном окружающей среды [5].

Интерес к исследованию циклических систем механики и физики возник и возрастает в связи с проблемой аварийной защиты циклических машин и механизмов, составляющих основу энергетики и транспорта. Эта, казалось бы, чисто прикладная задача затрагивает фундаментальные основы технических и естественных наук. Обеспечить надежную аварийную защиту механизма, у которого деградируют параметры конструкционного материала, возможно, только проводя систематический измерительно-вычислительный прогнозирующий мониторинг его технического состояния. При этом весьма важно непосредственно в процессе эксплуатации установить законы изменения параметров конструкционных материалов техническими средствами с помощью компактных встроенных систем.

Проблема успешно решается применением современных средств и методов прецизионной фазохронометрии: здесь удастся надежно регистрировать индивидуальные особенности каждого отдельного экземпляра контролируемых объектов, выпускаемых серийно и практически идентичных, т.е. неразличимых традиционно применяемой (штатной) контрольно-диагностической аппаратурой [8 – 10].

Таким образом, фазохронометрия обладает своего рода разрешающей способностью, обеспечивающей

- надежную регистрацию различия «идентичных» в исходном состоянии объектов;
- девиацию во времени или деградацию параметров конструктивных элементов машин и механизмов и конструкционных материалов, из которых они изготовлены.

Информационную емкость контрольно-измерительной системы здесь можно оценить соотношением:

$$I = \log_2(V/\delta V), \quad (3)$$

где  $V$  и  $\delta V$  – фазовые объемы, на которые отображаются контролируемая и контролирующая системы соответственно.

Благодаря высокой стабильности параметров и низкому уровню внутренних шумов отображение состояния реальной фазохронометрической системы локализуется в области фазового пространства малого объема, что и обеспечивает высокое разрешение или детальность при изучении технических объектов.

Благодаря этому открываются возможности реализации принципиально новых инженерных решений высокого уровня, в том числе:

- создание компактных встроенных фазохронометрических систем, способных обеспечить не просто информационно-метрологическое сопровождение функционирующих машин и механизмов, но и прогнозирующих измерительно-вычислительный мониторинг и их техническое состояние;
- прецизионный входной и выходной контроль, сертификационные испытания;
- непрерывное информационное сопровождение полного жизненного цикла машин и механизмов.

В последнем случае достигается оптимальное сочетание систематических фазохронометрических измерений (включая применение встроенных систем активного тестового контроля) с оперативной математической обработкой их результатов

Результаты измерений используются для идентификации математических моделей объектов, их непрерывного уточнения с целью, во-первых, адаптации математической модели к текущему техническому состоянию объекта и построения его прогноза и, во-вторых, для многофакторного математического имитационного моделирования с целью оптимизации параметров конструкции для ее модернизации и сокращения объемов опытно-конструкторских работ и натурных технологических испытаний.

К настоящему времени достижения науки и техники не обеспечивают в полной мере возможности оперативного ввода всего объема необходимой научной информации непосредственно в производственные и технологические процессы. Подобная же ситуация сложилась и при эксплуатации энергетических и транспортных систем. С этой точки зрения фазохронометрия – оптимальный канал получения и ввода научной информации непосредственно в процесс производства и эксплуатации.

Очевидно, фазохронометрия открывает и принципиально новые возможности повышения качества промышленной продукции на основе радикальных инженерных решений.

Качество промышленной продукции в значительной степени определяется уровнем метрологического обеспечения ее производства и уровнем национальной эталонной базы. Намечилось два пути ее дальнейшего совершенствования. Первый

из них заключается в переопределении единиц измерения физических величин системы СИ таким образом, чтобы эти единицы были привязаны к известным значениям фундаментальных констант [11], второй – к сведению реализации первичных эталонов к системам, в которых физические величины преобразуются в частоту [12].

В свете изложенного все более справедливым представляется мнение, что в наше время роста темпов и скоростей и возрастания требований к точности соблюдения синхронизма и синфазности как в устройствах электроники, электромеханики и механики, так и в крупномасштабных сложных системах да и в исторической перспективе изобретение часов оказывается более важным, чем изобретение тепловой машины.

#### Список литературы

- 1 Станюкович, К.П. О возрастании энтропии в бесконечной Вселенной / К.П. Станюкович // Доклады АН СССР. – 1949. – Т. 69, № 6. – С. 788–796.
- 2 Шеннон, К. Работы по теории информации и кибернетике / К. Шеннон – М. : ИЛ, 1963.
- 3 Харкевич, А.А. Очерки общей теории связи / А.А. Харкевич. – М. : Гостехиздат, 1955.
- 4 Кавалеров, А.А. Введение в информационную теорию измерений / А.А. Кавалеров, С.М. Мандельштам. – М. : Энергия, 1974. – 367 с.
- 5 Новицкий, П.В. Основы теории измерительных устройств / П.В. Новицкий. – Л. : Энергия, 1968. – 248 с.
- 6 Богуславский, С.А. К термодинамике периодических движений / С.А. Богуславский // ЖРФХО, физ. отд. – 1918. – Т. 49. – Вып. 1. – С. 138–156.
- 7 Воронцов, Ю.И. Теория и методы макроскопических измерений / Ю.И. Воронцов. – М. : Наука ; Гл. ред. Физ-мат. лит., 1989. – 280 с.
- 8 Киселев, М.И. Фазовый метод исследования циклических машин и механизмов на основе хронометрического подхода / М.И. Киселев, В.И. Пронякин // Измерительная техника. – 2001. – № 9. – С. 15–18.
- 9 Киселев, М.И. Расчет хронометрического отклика турбоагрегата на синусоидальное тестовое воздействие / М.И. Киселев, В.И. Пронякин, В.С. Темнов // Измерительная техника. – 2005. – № 10. – С. 48–50.
- 10 Прецизионные исследование работы турбоагрегата электронными средствами / М.И. Киселев, Н.А. Зройчиков, В.И. Пронякин, Я.В. Чивилев // Теплоэнергетика. – 2006. – № 11. – С. 10–13.
- 11 Миллс, Я.М. Переопределение килограмма, Ампера, Кельвина и Моля: предлагаемый подход к применению рекомендации 1 МКМВ (С1 – 2005) / Я.М. Миллс, П. Дж.ор и др. // Метрология. – 2007. – № 2. – С. 5–57.
- 12 Gook A.H. et all. Low-frequency noise in low // f noise de «SQUIDS» // Appl. Phys. Lett. – 1986. – Vol. 49. – P. 1393 – 1395.

*В.А. Петров*

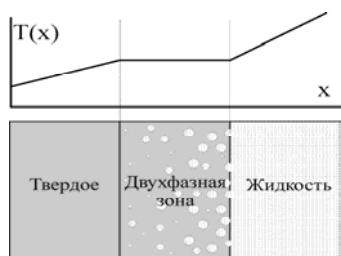
Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет)

#### **ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ И ОБРАЗОВАНИЕ ДВУХФАЗНОЙ ЗОНЫ В УСЛОВИЯХ РАДИАЦИОННО-КОНДУКТИВНОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА**

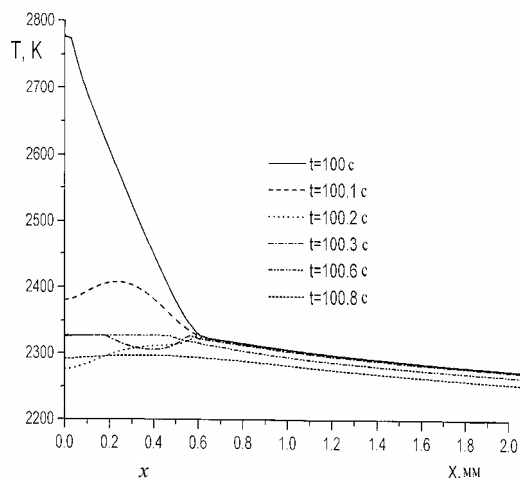
Перенос энергии в твердых материалах обычно осуществляется теплопроводностью. Однако есть материалы, где меньшую роль играет перенос энергии излучением. Эти материалы относят к классу полупрозрачных материалов. В определенных областях спектра теплового излучения они имеют малый коэффициент поглощения и пропускают падающее на них или собственное излучение на значительные расстояния. К полупрозрачным материалам относятся практически все диэлектрики и полупроводники, а также большинство органических веществ. Большая часть технологических процессов изготовления изделий из этих веществ осуществляется при высоких температурах, когда тепловое состояние изделий в значительной мере определяется совместным радиационно-кондуктивным теплопереносом (РКТ) внутри полупрозрачного материала. Среди различных задач РКТ по сложности математического описания и методов решения выделяются нестационарные задачи РКТ с наличием фазовых переходов. До настоящего времени абсолютное большинство имеющихся численных решений таких задач выполнено в упрощенной постановке (не зависящие от длины волны оптические свойства, плоская граница раздела фаз).

В данной работе в качестве фазового перехода рассматривается переход из твердого состояния в жидкое и в обратном направлении, хотя применяемый подход с небольшими изменениями может быть использован и для перехода из одной кристаллической модификации в другую. Длительное время для описания этого перехода применялась, как и для непрозрачных веществ, классическая модель, в которой рассматривались только два слоя – твердый и жидкий, разделенные гладкой границей, для которой записывались условия Стефана. По-видимому, впервые о недостатках такой модели даже применительно к непрозрачным веществам заговорили математики в начале шестидесятых годов. В результате была разработана теория обобщенного решения задачи Стефана, в которой предполагалось существование протяженной квазиравновесной двухфазной зоны. Были рассмотрены различные причины, которые могут привести к образованию двухфазной зоны, но нигде не анализировалась роль объемного радиационного теплопереноса внутри кристаллизующегося полупрозрачного вещества. В 1983 г. впервые была предложена модель плавления и затвердевания, учитывающая возможность образования протяженной двухфазной зоны за счет радиационного теплопереноса. При этом конкретно были рассмотрены лишь три сильно упрощенные задачи для модельных веществ. Хотя ясно, что образование двухфазной зоны возможно везде, где есть объемные источ-

ники или стоки тепла и в объеме могут появиться зародыши новой фазы, однако вопрос об экспериментальном или расчетно-теоретическом изучении возможности образования двухфазной зоны при плавлении и затвердевании тугоплавких диэлектриков и полупроводников до недавнего времени не рассматривался.



Более реальная математическая формулировка проблемы Стефана применительно к полупрозрачным веществам была предложена нами в 1999 г. Помимо одномерной нестационарной задачи совместного РКТ с учетом возможности образования двухфазной зоны, модель принимала во внимание возможные перегрев и переохлаждение, произвольные нелинейные граничные условия на передней и задней поверхностях образца, зависимость теплофизических свойств обеих фаз от температуры, а терморadiационных свойств – от температуры и длины волны. В качестве примера использования этой модели приводятся результаты численного расчета температурных полей в плоском образце оксида алюминия в процессе его нагрева концентрированным лазерным излучением и последующего охлаждения после его отключения. Оксид алюминия является единственным из тугоплавких оксидов, для расплава которого есть данные по оптическим и теплофизическим свойствам. Ниже представлены некоторые результаты расчета одномерного температурного поля в плоском образце  $Al_2O_3$  толщиной 10 мм, нагреваемом с одной из его сторон потоком излучения  $CO_2$  лазера плотностью  $600 \text{ Вт/см}^2$ . Показана лишь область толщиной 2 мм со стороны нагреваемой поверхности. Стадия нагрева не показана, а первый представленный температурный профиль относится к моменту отключения греющего лазерного излучения, соответствующему 100 с от начала нагрева. В этот момент температурный профиль был близок к квазистационарному, а толщина расплавленного слоя была равна 0,625 мм.

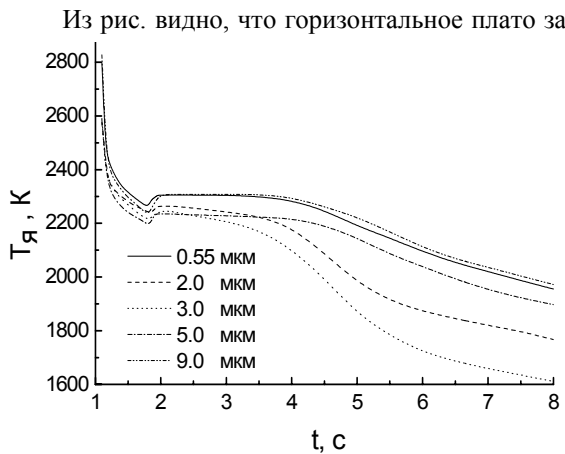


Температура поверхности быстро уменьшается и через 130 мс становится меньше температуры плавления, хотя жидкое состояние остается. Минимальная температура поверхности примерно на 50 К ниже температуры плавления. Двухфазная зона появляется вблизи поверхности, когда с момента начала охлаждения прошло немногим больше 0,2 с. Ее протяженность увеличивается очень быстро. В момент 100,3 с ее толщина равна 180 мкм, в момент 100,5 с – 340 мкм, и в момент 100,7 с двухфазная зона занимает почти весь слой, который был расплавлен перед началом охлаждения. Нужно отметить, что в момент 100,5 с тонкий слой твердой фазы появляется вблизи поверхности, но благодаря его высокой прозрачности он слабо влияет на теплоперенос в образце. Его температура близка к температуре затвердевания. Процесс полного затвердевания двухфазной зоны довольно продолжительный и занимает примерно 0,5 с. Именно этот процесс наблюдался ранее в экспериментах других авторов как участок с постоянной яркостной температурой при затвердевании расплавов оксидов в солнечных и дуговых печах и квалифицировался как плато затвердевания.

Однако наша математическая модель не учитывает рассеяния, которое может иметь место в затвердевшем слое из-за пористости и в двухфазной зоне из-за различий показателя преломления жидкой и твердой фаз. Поэтому были поставлены специальные эксперименты по затвердеванию в условиях быстрого охлаждения.

Один из экспериментов заключался в исследовании терморadiационных характеристик керамики из оксида алюминия с бассейном расплава на поверхности, образованного при лазерном нагреве. В этих экспериментах проводились высокоскоростные измерения отраженного образцом излучения зондирующего лазера с требуемой длиной волны как в процессе нагрева образца излучением непрерывного  $CO_2$  лазера, так и в процессе последующего охлаждения и затвердевания после отключения греющего излучения. При нагреве плотностью потока порядка  $1000 \text{ Вт/см}^2$  в течение 2,25 с толщина расплавленного слоя составляла около 0,25 мм. Плато затвердевания при измерении температуры на длинах волн 0,55 и 0,72 мкм не было плоским: после переохлаждения на термограмме наблюдался небольшой участок с малым наклоном. Он продолжался примерно 0,17 с.

В других экспериментах образец из предварительно оплавленного порошка чистого оксида алюминия, который затвердел в окружении такого же порошка, нагревался концентрированным лазерным излучением в окружающей воздушной атмосфере в течение более длительного промежутка времени, порядка 2–3 минут при плотности потока примерно  $1000 \text{ Вт/см}^2$ . В стационарном состоянии толщина расплава была около 2–3 мм. На рис. показаны результаты измерения яркостных температур для ряда длин волн, полученные в ходе процесса охлаждения после отключения греющего излучения. Поскольку в серии этих экспериментов были некоторые различия в величине плотности потока греющего излучения, участки нагрева не представлены. Начало охлаждения приведено к одному и тому же моменту времени.



Проведенный анализ микроструктуры поперечного скола затвердевших расплавов показал, что в случае, когда полная толщина затвердевшего слоя составляла около 0,4 мм, затвердевший расплав представлял собой совокупность реечных кристаллов тригональной ориентации, причем рейки состояли из элементарных кубических кристаллов. В промежутке между рейками были пустоты. В этом случае наиболее вероятно гомогенное зародышеобразование. Из-за малой толщины весь слой расплава интенсивно охлаждался за счет объемного излучения, и скорость охлаждения много больше, чем в эксперименте с толстым слоем расплава. Переохлаждение вызывает объемное образование зародышей и рост зерен случайной ориентации.

Микроструктура закристаллизовавшегося толстого слоя расплава несколько отличалась. Приповерхностный слой толщиной примерно 450 мкм состоял из двух подслоев: верхний толщиной примерно 250 мкм дендритного строения (оси дендритов вытянуты в направлении, перпендикулярном поверхности), и нижний, состоящий из более изометрических частиц. За приповерхностным слоем следовала зона крупных столбчатых кристаллов, в большей или меньшей степени разориентированных относительно нормали к поверхности образца. Пустоты и микротрещины видны в обоих подслоях, и они также могли являться причиной рассеяния. Конечно, коэффициент рассеяния в двухфазной зоне и закристаллизовавшемся слое зависел от длины волны. Образование пустот и трещин связано с большим увеличением (примерно на 20 %) плотности  $Al_2O_3$  при затвердевании. Хотя структура закристаллизовавшегося более толстого слоя расплава отличается от структуры более тонкого, образование двухфазной зоны в процессе кристаллизации и здесь весьма вероятно. Дендритный характер роста кристаллов в приповерхностном слое говорит о том, что отдельные дендриты росли с поверхности вперед, в переохлажденный расплав, и вширь, в расплав, находящийся между отдельными дендритами. Переход от дендритного роста к росту примерно изометрических зерен связан с уменьшением скорости охлаждения в более глубоких слоях расплава.

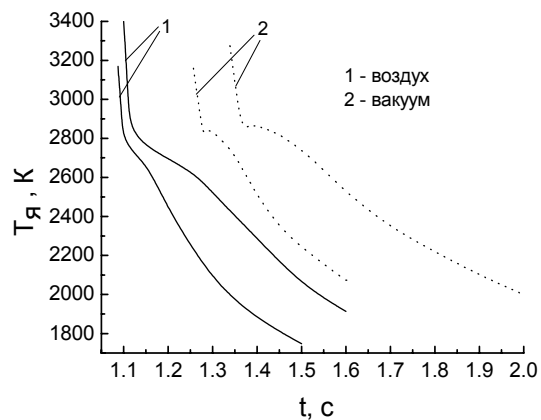
Чтобы подтвердить возможность образования двухфазной зоны при быстрой кристаллизации других тугоплавких оксидов, были проведены эксперименты с кубическим оксидом циркония, стабилизированным 18 мол.% оксида кальция. Эти эксперименты проведены в вакууме и окружающей воздушной атмосфере.

Одно из принципиальных отличий полученных результатов заключалось в том, что переохлаждение наблюдалось в вакууме и отсутствовало в воздухе. Из-за потери кислорода слой расплава и примыкающий к нему слой керамики в случае экспериментов в вакууме становились черными. После экспериментов отражение образца при комнатной температуре оставалось очень низким во всем исследованном спектральном интервале от 0,63 до 3,39 мкм.

Это означает, что коэффициент поглощения в процессе нагрева в вакууме необратимо увеличился и материал стал практически непрозрачным. После экспериментов в воздухе цвет керамики и затвердевшего расплава не изменился. В ходе нагрева коэффициент поглощения, конечно, увеличивался, однако даже при предельной температуре 3400 К расплав оксида в воздухе следует рассматривать как полупрозрачное вещество. Действительно, микрофотографии структуры показали, что примыкающий к поверхности слой толщиной около 70 мкм затвердевал в воздухе как отдельные дендритные кристаллы с размерами от 10 до 50 мкм звездообразной формы без какой-либо преимущественной ориентации с пустотами между ними. Это означает, что он кристаллизовался при объемном зародышеобразовании с существованием двухфазной зоны. Из-за высоких значений коэффициента поглощения при нагреве в вакууме затвердевание начиналось на поверхности, где переохлаждение было максимальным. Зерна росли внутрь, внешний, примыкающий к поверхности слой, наблюдавшийся при кристаллизации в воздухе, отсутствовал, и двухфазная зона также отсутствовала.

Таким образом, результаты проведенных экспериментов и численных расчетов показали, что наблюдаемое температурное плато при затвердевании объясняется существованием двухфазной зоны. Однако такая двухфазная зона образуется не всегда. Ее образование зависит от величины коэффициента поглощения расплава, скорости охлаждения и самой величины температуры затвердевания, определяющей вклад объемного радиационного теплопереноса.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 05-02-16290).



Таким образом, результаты проведенных экспериментов и численных расчетов показали, что наблюдаемое температурное плато при затвердевании объясняется существованием двухфазной зоны. Однако такая двухфазная зона образуется не всегда. Ее образование зависит от величины коэффициента поглощения расплава, скорости охлаждения и самой величины температуры затвердевания, определяющей вклад объемного радиационного теплопереноса.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 05-02-16290).



## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА КАК СРЕДСТВО ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ

Большая распространенность теплообменного оборудования обуславливает важность проблемы снижения его веса и габаритов, что прямо связано с решением задач энерго- и ресурсосбережения. Уменьшение затрат природных ресурсов (топлива, руд металлов, природных ископаемых, кислорода атмосферного воздуха, воды и т.д.) на изготовление теплообменного оборудования является не только экономической задачей, но и позволяет минимизировать загрязнение окружающей среды. Повышение технического уровня теплообменного оборудования и улучшение его массогабаритных характеристик достигается путем интенсификации процессов теплообмена. Вопросам интенсификации конвективного теплообмена посвящены монографические издания [1–3 и др.] и большое число научных статей в периодической литературе.

Конечной целью интенсификации конвективного теплообмена в теплообменном аппарате является уменьшение необходимой площади поверхности теплопередачи.

Из основного уравнения теплопередачи  $Q = k F(t_r - t_x)$  следует, что при заданном потоке тепла  $Q$ , передаваемом в теплообменном аппарате, уменьшить площадь поверхности теплопередачи  $F$ , а, следовательно, и стоимость аппарата, возможно за счет увеличения коэффициента теплопередачи  $k$  или разности температур  $(t_r - t_x)$  горячего и холодного теплоносителей. Повышение разности температур  $(t_r - t_x)$  термодинамически не выгодно и не всегда возможно из-за технологических и других ограничений.

Коэффициент теплопередачи зависит, если не принимать во внимание термические сопротивления теплопередающей стенки и откладывающиеся на поверхностях стенки слои загрязнений, от коэффициентов теплообмена горячего  $\alpha_r$  и холодного  $\alpha_x$  теплоносителей:  $k = \alpha_r \cdot \alpha_x / (\alpha_r + \alpha_x)$ . По своей величине  $k$  всегда меньше меньшего из значений  $\alpha_r$  и  $\alpha_x$ . Поэтому увеличивать  $k$  следует за счет повышения интенсивности теплообмена теплоносителя, имеющего меньшее  $\alpha_i$ . На практике такими теплоносителями чаще всего являются потоки газа и, в частности, продукты сгорания топлива.

К настоящему времени предложено много различных способов интенсификации конвективного теплообмена. Их разделяют на пассивные, активные и сложные. К пассивным относят методы, в которых за счет придания поверхности теплообмена специальной геометрической формы, например путем оребрения, размещения на поверхности элементов дискретной шероховатости, использования закручивателей потока, оказывается турбулизирующее воздействие на поток теплоносителя или создаются в пристенной зоне потока участки с завихренным течением. В активных методах используется механическое воздействие на поверхность теплообмена (вибрация, вращение) и воздействие на поток теплоносителя электрическим, магнитным, акустическим полями, а также другие приемы, требующие применения дополнительной внешней энергии. В сложных методах одновременно используется не менее двух методов интенсификации конвективного теплообмена.

Применение любого метода интенсификации теплообмена сопровождается ростом гидравлического сопротивления движению потока теплоносителя. Поэтому при выборе метода интенсификации наряду с ростом теплообмена необходимо учитывать затраты мощности на прокачку теплоносителя. Для потоков газа характерным является локализация основной части термического сопротивления теплопереносу в тонком слое возле поверхности омываемой стенки. Воздействия на данный пристенный слой с целью его перемешивания активизируют обменные процессы и снижают термическое сопротивление. Наиболее просто такого рода воздействия можно осуществлять с помощью элементов дискретной шероховатости, размещаемых на стенке. Многочисленными исследованиями разных авторов определены оптимальные формы и размеры элементов шероховатости для разных условий течения потоков. Например, для турбулентного потока газа в трубе диаметром  $d$  рекомендовано [1] размещать в диаметральных сечениях кольца-диафрагмы высотой  $h = 0,0325d$  с продольным шагом  $t = 0,5d$ . При этом коэффициент теплообмена увеличивается в 2,3 – 2,5 раза по отношению к трубе с гладкой стенкой. Наличие колец приводит и к увеличению коэффициента сопротивления движению потока в 3,7 – 4,5 раза, но потеря давления потока может быть даже меньшей, чем в гладкой трубе, из-за уменьшения длины трубы, необходимой для передачи тепла.

Элементы дискретной шероховатости использовались в разработанных нами огневых подогревателях эмульсионной нефти, которые предназначены для использования в технологии подготовки нефти на промыслах.

Подогреватель типа БН-5,6 тепловой мощностью 5,6 МВт состоит из четырех секций, каждая из которых включает в себя прямую жаровую трубу диаметром 600 мм и длиной 11 500 мм с камерой сгорания газа с одной стороны и отводом продуктов сгорания в общую для секций дымовую трубу с другой стороны. Жаровая труба помещена в кожух, снабженный линзовым компенсатором температурных расширений. В кольцевом пространстве шириной 40 мм между жаровой трубой и кожухом по всей его длине размещено винтообразное ребро. Наличие ребра позволяет осуществить продольно-круговое движение нагреваемой нефти в кольцевом пространстве вокруг жаровой трубы, что исключает образование застойных зон и обеспечивает скорости, достаточные для смыывания свободных отложений на поверхности нагрева. Скорость движения эмульсии составляет около 1,8 м/с, благодаря чему максимальная температура стенки жаровой трубы не превышает 200 °С и исключается возможность активного коксования нефти на поверхности нагрева.

Проведены испытания секции нагрева подогревателя БН-5,6 для двух случаев исполнения жаровой трубы: 1) с гладкой внутренней поверхностью; 2) при размещении на внутренней поверхности элементов дискретной шероховатости, выполнен-

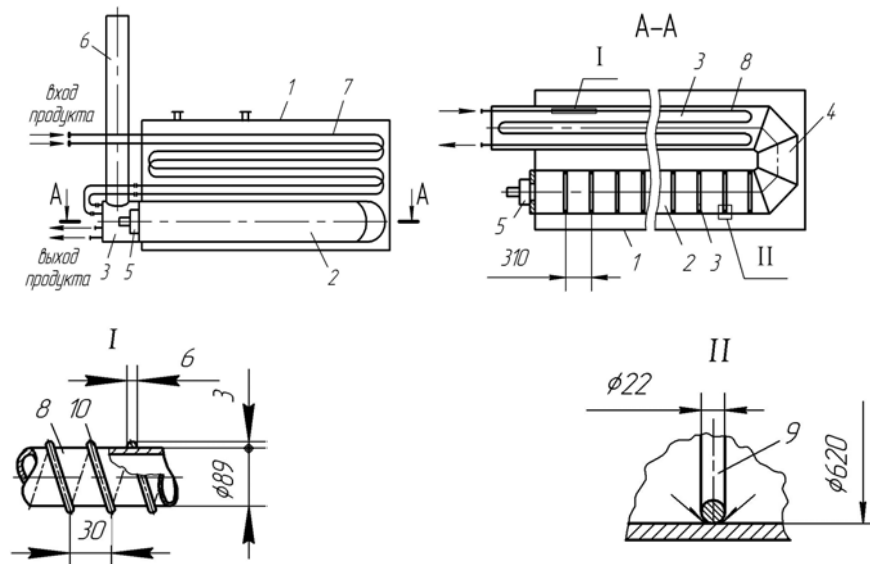
ных в виде колец-диафрагм с оптимальными размерами. Сжигался попутный нефтяной газ с теплотой сгорания  $Q_{н}^p = 38,1$  МДж/м<sup>3</sup> при коэффициенте избытка воздуха 1,05.

При работе с номинальной тепловой мощностью температура продуктов сгорания на выходе из жаровой трубы в первом случае достигала 800 °С, а во втором случае она снизилась до 240 °С. Тепловой к.п.д. составил соответственно  $\eta_1 = 0,59$  и  $\eta_2 = 0,88$ .

Расход топлива для второго варианта исполнения жаровой трубы при равных с первым вариантом тепловых мощностях секции был существенно меньшим.

Промышленностью выпущено несколько сотен подогревателей типа БН-5,6 которые успешно работают на нефтяных месторождениях стран СНГ.

Подогреватель типа ПНК-1,9 тепловой мощностью 1,9 МВт включает в себя прямоугольной формы корпус с габаритными размерами 5500 (длина)×1600 (ширина)×1600 (высота) мм, заполненный промежуточным теплоносителем – водой. В нижней части объема корпуса размещена U-образная жаровая труба внутренним диаметром 620 мм, а в верхней части – первая секция продуктового змеевика.



**Рис. Схема подогревателя ПНК-1,9:**

1 – корпус; 2, 3 – высокотемпературная и низкотемпературная зоны жаровой трубы; 4 – поворотная камера; 5 – горелочное устройство; 6 – дымовая труба; 7 – часть продуктового змеевика, размещенная в промежуточном теплоносителе; 8 – часть продуктового змеевика, размещенная в жаровой трубе; 9 – кольца-турбулизаторы; 10 – выступы-турбулизаторы

Вторая секция продуктового змеевика размещена в низкотемпературной (хвостовой) зоне жаровой трубы. Продуктовый змеевик выполнен из прямых труб наружным диаметром 89 мм, соединенных крутоизогнутыми отводами с шагом 160 мм. Тепло от продуктов сгорания в жаровой трубе передается нагреваемой нефти в продуктовых трубах как через промежуточный теплоноситель, так и при прямом контакте с трубами второй секции змеевика. На внутренней стороне стенки высокотемпературной зоны жаровой трубы установлены кольца-диафрагмы, а на поверхность продуктовых труб второй секции змеевика наплавлены выступы-турбулизаторы, выполненные в виде спирали. Данные элементы дискретной шероховатости, интенсифицирующие конвективный теплообмен продуктов сгорания, имеют оптимальные высоту и шаг размещения.

Испытания подогревателя ПНК-1,9 показали его высокие эксплуатационные и энергетические характеристики [4]. При номинальной тепловой мощности к.п.д. подогревателя составил 88 %. Наличие элементов дискретной шероховатости на поверхностях теплообмена приводит к росту гидравлического сопротивления движению продуктов сгорания. Но, как показали измерения, величина потери давления газа в жаровой трубе не является большой (при номинальной тепловой мощности  $\Delta P = 330$  Па) и вполне компенсируется за счет избыточного давления в камере сгорания топлива. При этом нет необходимости в дополнительном источнике тяги, а высота дымовой трубы может быть ограничена величиной 3 м, достаточной для рассеивания продуктов горения топлива.

Сравнение характеристик выпускаемых промышленностью «неинтенсифицированных» подогревателей примерно такой же номинальной тепловой мощности и подогревателя типа ПНК-1,9 показывает, что массогабаритные показатели последнего в 3–6 раз лучше.

В настоящее время производство подогревателей ПНК-1,9 освоено на Сызранском заводе «Нефтемаш».

#### Список литературы

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

2 Гортышев, Ю.Ф. Теплогидравлический расчет и проектирование оборудования с интенсифицированным теплообменом / Ю.Ф. Гортышев, В.В. Олимпиев, Б.Е. Байгалиев. – Казань : Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2004. – 432 с.

3 Назмеев, Ю.Г. Теплообмен при ламинарном течении жидкости в дискретно-шероховатых каналах / Ю.Г. Назмеев – М. : Энергоатомиздат, 1998. – 376 с.

4 Результаты испытаний подогревателя нефти ПНК-1,9 с интенсифицированным теплообменом продуктов горения топлива / Ю.Я. Печенегов, А.Л. Мыдлык, А.В. Бутузов и др. // Труды Четвертой Российской национальной конференции по теплообмену. Т.6. Дисперсные потоки и пористые среды. Интенсификация теплообмена. – М. : Изд. Дом МЭИ, 2006. – С. 274–278.

### *А.И. Савватимский*

Объединенный институт высоких температур РАН (г. Москва)

## **ТЕМПЕРАТУРА ПЛАВЛЕНИЯ ГРАФИТА**

Рассматриваются различные импульсные эксперименты по определению температуры плавления графита (как импульсом тока, так и лазерным импульсом). При их совместном рассмотрении делается вывод о наиболее вероятной температуре плавления  $T = 4800 \pm 100$  К, полученной при давлениях от 100 бар до 3 кбар [1, 2]. Преимущество быстрого нагрева состоит в отсутствии тепловых потерь за время эксперимента и в сохранении формы плавящегося образца. Калибровка быстродействующего пирометра (изготовленного В.Н. Коробенко), предназначенного для температурных измерений, проводилась по зависимости введенной удельной энергии  $E$  от температуры  $T$  для температуры  $T = 4500$  К, полученной М.А. Шейндлиным и В.Н. Сенченко (ОИВТ РАН).

Подробно рассматриваются эксперименты в ОИВТ РАН при быстром нагреве графита импульсом тока, начиная с 1972 г. Показано, что первые эксперименты выполнялись с графитами невысокой начальной плотности, что создавало ряд проблем при измерении температуры. Эти проблемы удалось решить, последовательно переходя от графитов малой начальной плотности к высокоориентированным графитам высокой начальной плотности ( $2,2$  г/см<sup>3</sup>), причем при использовании предварительного отжига образцов при  $3000$  °С. Это позволило не только зарегистрировать температурное плато при плавлении графита, но и обнаружить характерные отметки плавления на кривой электросопротивления. Поэтому стало возможным сопоставить температурные измерения с изменением объемных свойств графита при быстром нагреве. В результате развития методики быстрого (несколько микросекунд) нагрева импульсом тока удалось надежно фиксировать стадию плавления как по температуре, так и по введенной удельной энергии. Для контроля температурных измерений использовалась модель черного тела, изготовленная из двух графитовых пластинок, которая после плавления продолжала «жить» и в жидком состоянии, так как за счет кратковременности процесса не успевала изменить свою форму. Эта модель черного тела калибровалась по плавлению такой же модели, изготовленной из вольфрама. Температурному плато при плавлении вольфрама приписывалась температура  $3690$  К. Результат для плавления графита остался прежним:  $4800$  К.

Рассмотрен ряд экспериментов при нагреве графитовых образцов в капиллярных трубках (изохорные условия нагрева). Для максимальной введенной удельной энергии  $38$  кДж/г получена температура  $10\ 600$  К. Эта температура оценена по величине изохорной теплоемкости ( $3$  Дж/г · К), измеренной также в изохорных условиях, но при высоком давлении (порядка  $50$  кбар). Использование капиллярных трубок позволило оценить плотность жидкого углерода после плавления. Полученные экспериментальные результаты для плотности жидкого углерода (выше  $T = 4800$  К) сравниваются с расчетными данными других авторов.

Работа по исследованию плотности жидкого углерода (на данном этапе) поддержана грантом РФФИ № 07-08-00070-а.

### Список литературы

- 1 Савватимский, А.И. *УФН*. – 2003. – Т. 173, № 12. – С. 1371–1379.
- 2 Savvatimskiy, A.I. *CARBON*. – 2005. – V. 43. – P. 1115–1142.

**Секция 1**

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
ТЕПЛОФИЗИКИ**

Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет)

**ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОЛЯ И ОБРАЗОВАНИЕ РАСПЛАВА ПРИ НАГРЕВЕ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ ПОТОКОМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РАЗЛИЧНОЙ ПЛОТНОСТИ**

Общая формулировка проблемы радиационно-кондуктивного переноса энергии (РКПЭ) применительно к нагреву плоского слоя оксида алюминия концентрированным лазерным излучением и последующему охлаждению после отключения греющего потока была описана ранее в [1]. Однако опубликованные результаты расчетов охватывали только стадии охлаждения и кристаллизации расплава. В настоящей статье представлены результаты, относящиеся к стадии нагрева.

Одномерная нестационарная задача РКПЭ рассматривается в постановке, которая на сегодняшний день является самой общей. В модели учитываются произвольные нелинейные граничные условия теплообмена как излучением, так и конвекцией на передней и задней поверхностях образца, зависимость теплофизических свойств твердой фазы и расплава от температуры, а терморadiационных и оптических свойств – от температуры и длины волны. Модель включает возможное образование протяженной двухфазной зоны, в которой фазовый переход осуществлялся лишь частично.

Рассматривается плоский слой нерассеивающего тугоплавкого оксида толщиной  $L$ , который нагревается с передней поверхности ( $x = 0$ ) лазерным излучением. Уравнение сохранения энергии для однофазного состояния (твердое или жидкое) в одномерном случае может быть записано в виде:

$$\rho(T)C_p(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right) + Q_l(x) + Q_{rad}(x),$$

где  $\rho(T)$  – плотность;  $C_p(T)$  – теплоемкость;  $\Lambda(T)$  – теплопроводность;  $Q_l(x)$  – функция внутренних источников тепла для нагрева лазерным излучением:

$$Q_l(x) = q_0(t)(1 - R_l)k_l \exp(-k_l x),$$

где  $q_0(t)$  – плотность потока лазерного излучения, падающего на поверхность  $x = 0$ ;  $R_l$  – отражательная способность передней поверхности слоя для длины волны лазерного излучения;  $k_l$  – коэффициент поглощения для лазерного излучения;  $Q_{rad}$  – внутренние источники тепла из-за радиационного переноса энергии:

$$Q_{rad}(x) = 2\pi \int_{-1}^1 d\mu \int_0^{+\infty} k(\nu, T) \left( I(\nu, x, \mu) - n^2(\nu, T) I_p(\nu, T(x)) \right) d\nu,$$

где  $\mu$  – косинус угла между направлением распространения излучения и нормалью к поверхности;  $\nu$  – частота излучения;  $I(\nu, x, \mu)$  – интенсивность излучения;  $I_p(\nu, x, \mu)$  – равновесная (планковская) интенсивность излучения;  $n(\nu, T)$  – показатель преломления.  $I_\nu(x, \mu)$  рассчитывается из уравнения переноса излучения:

$$\mu(x) \frac{\partial I_\nu(x, \mu)}{\partial x} = k(\nu, T) \left[ n^2(\nu, T) I_p(\nu, T(x)) - I_\nu(x, \mu) \right],$$

где  $\mu(x)$  изменяется в соответствии с законом Снелла:

$$n(\nu, T) \sqrt{1 + \mu^2(x)} = \text{const.}$$

Граничные условия на свободных поверхностях имеют вид:

$$\Lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha(T - T_0) + \varepsilon^\otimes \sigma \phi(T)(T^4 - T_0^4) \quad \text{при } x = 0;$$

$$\Lambda \frac{\partial T}{\partial x} = -\alpha(T - T_0) - \varepsilon^\otimes \sigma \phi(T)(T^4 - T_0^4) \quad \text{при } x = L;$$

$$\begin{cases} I_\nu^+(\mu) \Big|_{x=0} = R_\nu(\mu) I_\nu^-(\mu) \Big|_{x=0} & \mu > 0; \\ I_\nu^-(\mu) \Big|_{x=L} = R_\nu(\mu) I_\nu^+(\mu) \Big|_{x=L} & \mu > 0. \end{cases}$$

В этих формулах:  $\alpha$  – коэффициент конвективной теплоотдачи с поверхности;  $\varepsilon^\otimes$  – эффективная излучательная способность материала в спектральной области его непрозрачности;  $\phi(T)$  и  $\phi(T)$  – относительные части потока равновесного теплового излучения в области непрозрачности;  $I_\nu^+(\mu)$  и  $I_\nu^-(\mu)$  – интенсивности излучения в направлении положительной и

отрицательной оси  $x$ , соответственно;  $R_v(\mu)$  – отражательная способность поверхности, рассчитываемая по формулам Френеля;  $\sigma$  – постоянная Стефана–Больцмана;  $T_0$  – температура окружающей среды.

Кроме приведенных, в модели сформулированы граничные условия для уравнения сохранения энергии и для уравнения переноса излучения на внутренних границах фаз.

На рис. 1 представлены результаты расчета полей температур в плоском слое монокристаллического оксида алюминия толщиной 5 мм при нагреве плотностью потока  $q_2 = 400 \text{ Вт/см}^2$ .

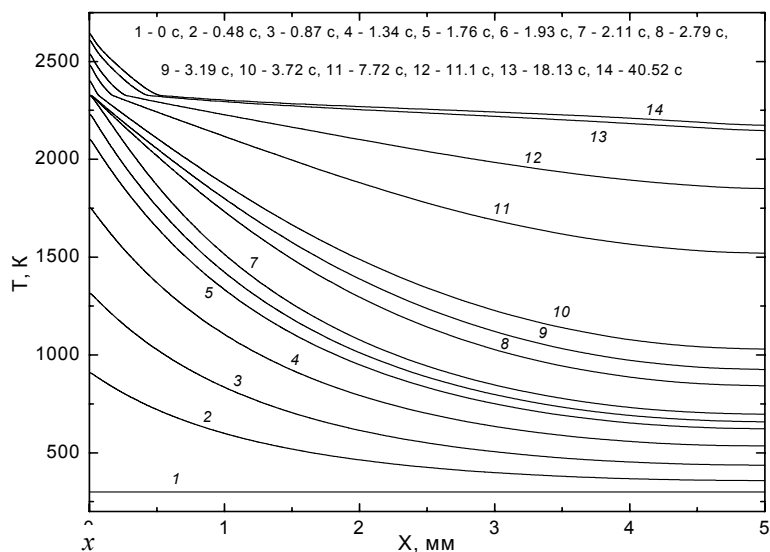


Рис. 1 Поля температуры при нагреве плотностью потока  $400 \text{ Вт/см}^2$

На поверхности температура плавления  $2327 \text{ К}$  достигается в момент  $t = 2,11 \text{ с}$  от начала нагрева и в процессе дальнейшего нагрева не изменяется в течение  $1,08 \text{ с}$ , а двухфазная зона плавления за этот промежуток времени немного расширяется. Начиная с момента  $3,19 \text{ с}$ , появляется слой однофазного расплава, и в процессе дальнейшего нагрева толщина расплава и температура его поверхности увеличиваются. К моменту, соответствующему  $40 \text{ с}$  от начала нагрева, толщина расплава составляет  $0,525 \text{ мм}$ , а температура передней поверхности –  $2643 \text{ К}$ . При этом температура задней поверхности образца составляет  $2174 \text{ К}$ . После  $40 \text{ с}$  температура практически не изменяется.

На рис. 2 показано изменение температур передней и задней поверхностей, а также толщины расплава при нагреве  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в течение  $100 \text{ с}$  двумя различными плотностями потока.

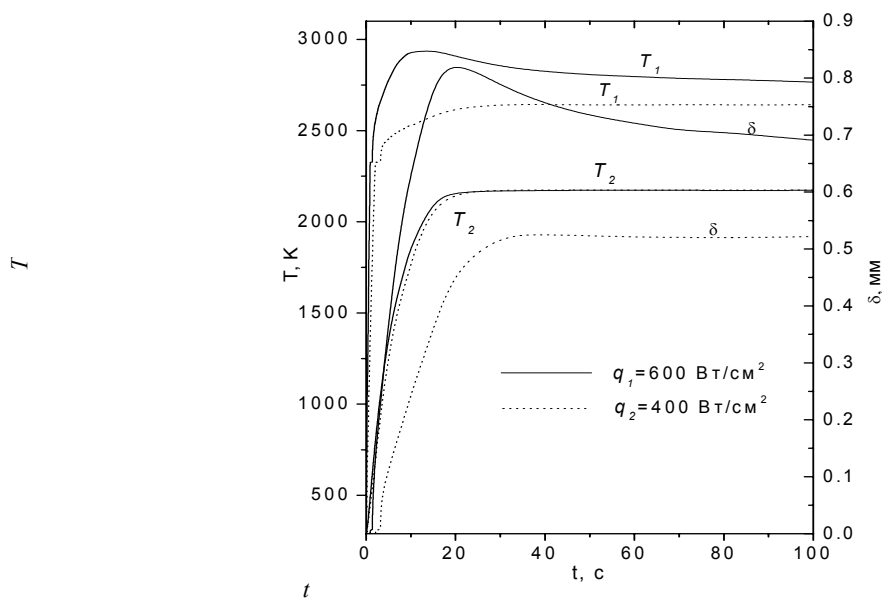


Рис. 2 Температуры передней и задней поверхностей образца

Видно, что при нагреве плотностью потока  $q_2$  обе температуры монотонно увеличиваются и выходят на постоянные значения. То же происходит и с толщиной расплава. Однако с увеличением плотности потока до  $q_1$  картина изменяется. Температура передней поверхности достигает максимума примерно через  $14 \text{ с}$  от начала нагрева. Максимум толщины расплава приходится на  $20,5 \text{ с}$ . Температура же задней поверхности, так же, как и при  $q_2$ , выходит на то же стационарное значение около  $40 \text{ с}$ , при этом температура передней поверхности и толщина расплава продолжают уменьшаться вплоть до  $100 \text{ с}$ . Это отличие обусловлено «забросом» температуры расплавленного слоя на начальной стадии нагрева большей плотностью потока. Когда температура задней поверхности выходит на стационарное значение, то возникший на первой стадии нагрева «заброс» температуры расплава постепенно рассасывается за счет отвода тепла с передней поверхности.

Список литературы

1 Petrov, V. A. Numerical simulation of concentrated laser radiation heating of refractory oxides / V.A. Petrov, V.E. Titov, A.Yu. Vorobyev // High Temp.– High Press. – 1999. – V. 31. – P. 267–274.

*О.С.Дмитриев<sup>1</sup>, С.В.Мищенко<sup>1</sup>, С.О.Дмитриев<sup>1</sup>  
А.З.Херрман<sup>2</sup>, К.Хоффмейстер<sup>2</sup>*

1 – ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»,  
2 – AIRBUS, Bremen, Germany

**ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И КИНЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
УГЛЕПЛАСТИКОВ В ПРОЦЕССЕ ОТВЕРЖДЕНИЯ**

Теплофизические и кинетические характеристики углепластиков, измеренные в процессе отверждения, являются важнейшими параметрами математической модели, необходимыми при расчете и оптимизации температурно-временных режимов производства изделий из них. Учитывая влияние технологического давления на теплопроводность полимерных композиционных материалов (ПКМ), а также наличие межфазных явлений, происходящих на границе раздела смолы и наполнителя, определение теплофизических и кинетических характеристик необходимо проводить в условиях близких к условиям получения изделий из композитов в технологическом процессе [1].

Имеющиеся в настоящее время приборы и установки для определения этих характеристик ориентированы, в основном, для исследования теплофизических характеристик (ТФХ) отвержденных композитов, как, например ИТ-С-400, ИТ-λ-400, ИТ-4, или кинетики отверждения малых по размеру образцов с помощью ДСК, при отсутствии технологического давления. Это обстоятельство ограничивает использование стандартных методов и приборов для исследования процесса отверждения композитов. Поэтому перспективными является методы и устройства, позволяющие при исследовании воспроизводить условия технологического процесса, т.е. технологическое давление, исследование наполненного композита вместо чистой смолы и т.д., а также проводить одновременное исследование нескольких характеристик в одном эксперименте. Определяемые в условиях близких к технологическому процессу свойства является в некотором смысле эффективными и несут в себе неучтенные при математическом описании и моделировании факторы. Поэтому для исследования свойств материалов использована разработанная ТГТУ информационно-измерительная система (ИИС) научных исследований, предназначенная для управления ходом эксперимента, сбора и обработки опытных данных, ведения банка данных, решения обратных задач теплопроводности и кинетики [2].

В основу метода определения ТФХ композитов: объемной теплоемкости  $C(T, \beta)$ , теплопроводности  $\lambda(T, \beta)$  в зависимости от температуры  $T$  и степени отверждения  $\beta$ , а также мощности тепловыделений  $W(t)$  и полного теплового эффекта  $Q_f$  – положено решение обратной задачи теплопроводности полученное методом интегральных характеристик. Результатом решения являются расчетные формулы и алгоритмы обработки опытных данных, составляющие основу математического обеспечения ИИС.

Определение объемной теплоемкости  $C(T, \beta)$  и теплопроводности  $\lambda(T, \beta)$  в зависимости от температуры  $T$  и степени отверждения  $\beta$  процесса проводится в предельных состояниях композита: отвержденном  $C_{cd}(T)$ ,  $\lambda_{cd}(T)$  при  $\beta = 1$ , неотвержденном  $C_{pr}(T)$ ,  $\lambda_{pr}(T)$  при  $\beta = 0$  и в процессе отверждения  $C_w(T)$ . Зависимость теплоемкости от степени отверждения моделируется аддитивной функцией температурных зависимостей отвержденного и неотвержденного композита при фиксированном значении содержания связующего  $\gamma$  в композите. Зависимость теплопроводности  $\lambda(T, \beta)$  от степени отверждения  $\beta$ , используя температурные зависимости теплопроводностей отвержденного  $\lambda_{cd}(T)$  и неотвержденного  $\lambda_{pr}(T)$  состояния связующего в композите, моделируется соответствующим выражением при фиксированном значении содержания связующего  $\gamma$  в композите, равном содержанию связующего  $\gamma_m$  при измерении ТФХ.

Кинетические параметры, т.е. энергия активации процесса отверждения  $E(\beta)$  и кинетическая функция  $\varphi(\beta)$ , определяются методом равных конверсий по мощности тепловыделений  $W(t)$ , измеренной при отверждении двух или более образцов, нагреваемых по различным температурно-временным режимам  $T_i(t)$ .

Экспериментальное исследование и получение исходных данных для определения искомых характеристик ПКМ заключается в нагреве и отверждении образца исследуемого материала в измерительном устройстве ИИС с измерением и регистрацией изменения во времени температуры  $T_{ij}$  в нескольких точках по толщине образца, граничных тепловых потоков  $q_i$ , толщины  $L$  и давления  $P$ . С помощью ИИС выполнены исследования теплофизических и кинетических характеристик углепластиков в процессе отверждения, свойства одного из них приведены на рис. 1 и 2.

Перед началом исследования образец материала укладывается в рабочую камеру измерительной ячейки. При этом между образцом и нагревателями прокладывается фторопластовая пленка. С помощью микропресса прикладывается к образцу заданное, определенное условиями эксперимента усилие  $F$ . Образец выдерживается под давлением 1 МПа при температуре 30 °С в течение 30 минут, необходимым для выравнивания слоев препрега, заполнения связующим пустот и вытеснения образовавшихся пузырьков воздуха из межслойного пространства, т.е. производится формование образца. После предварительного нагрева и формования образец охлаждается до комнатной температуры.

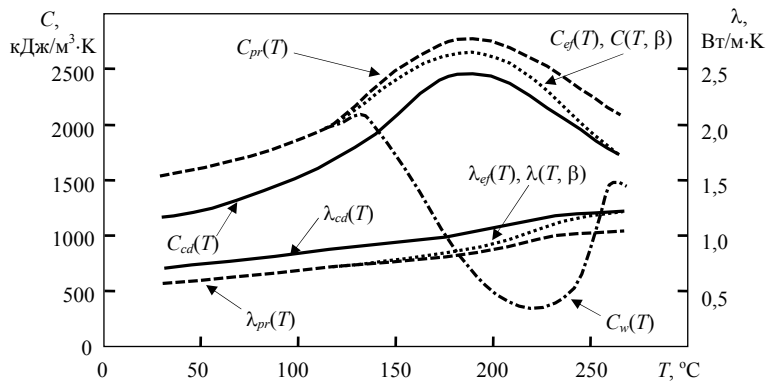


Рис. 1 ТФХ углепластика при отверждении

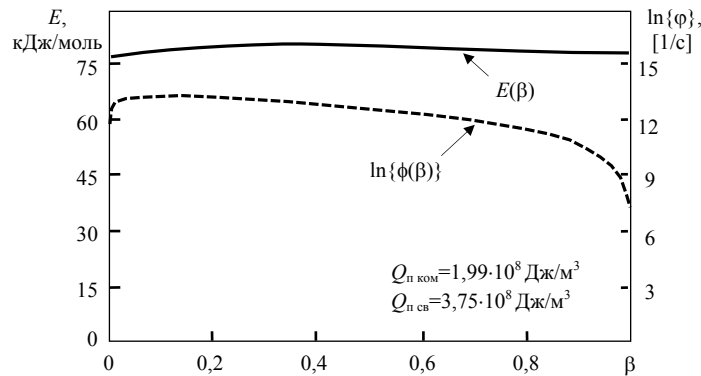


Рис. 2 Кинетические характеристики отверждения углепластика

Вследствие того, что способ укладки углеродного волокна в образце полностью повторяет реальное изделие, большое количество слоев препрега может иметь однонаправленную укладку. В процессе отверждения под давлением эти слои выдавливаются, что искажает условия проведения эксперимента. Поэтому отверждение образцов проводили внутри специальной рамки, изготовленной из прочного материала с низкой теплопроводностью. Рамка не позволяет слоям выдавливаться, но несколько изменяет тепловую ситуацию в измерительном устройстве, что вызывает необходимость в дополнительной настройке измерительного устройства с рамкой.

Для определения ТФХ достаточно провести один эксперимент, а для определения кинетических параметров – два и более. При этом каждый образец исходного материала подвергается нагреву. При первом нагреве происходит отверждение связующего. При достижении допустимой температуры  $T_{\max}$  образец охлаждается до комнатной температуры и затем подвергается повторному нагреву. По тепловым измерениям повторного нагрева  $T_{ij}$ ,  $q_i$  определяются ТФХ отвержденного композита  $C_{cd}(T)$ ,  $\lambda_{cd}(T)$ . По тепловым измерениям первого нагрева  $T_{ij}^*$ ,  $q_i^*$  вычисляются экзотермические ТФХ  $C_w(T)$ ,  $\lambda_w(T)$ . Затем совместная обработка температурных измерений первого нагрева  $T_{ij}^*$ , экзотермических ТФХ  $C_w(T)$ ,  $\lambda_w(T)$  и ТФХ отвержденного композита  $C_{cd}(T)$ ,  $\lambda_{cd}(T)$  позволяет вычислить мощность тепловыделений  $W(t)$ , полный тепловой эффект  $Q_f$  и ТФХ композита в процессе отверждения  $C_{ef}(T)$ ,  $\lambda_{ef}(T)$  или  $C(T, \beta)$ ,  $\lambda(T, \beta)$ .

Таким образом, исследованы теплофизические и кинетические характеристики углепластика при отверждении в условиях близких к технологическому процессу производства изделий из ПКМ, наиболее пригодные для моделирования, расчета и оптимизации температурно-временных режимов отверждения.

#### Список литературы

- 1 Балакирев, В.С. Автоматизированные производства изделий из композиционных материалов / В.С. Балакирев. – М. : Химия, 1990. – 240 с.
- 2 Дмитриев, А.О. Интегрированная информационно-измерительная система исследования свойств полимерных композитов в процессе отверждения / А.О. Дмитриев, С.О. Дмитриев // В этом сборнике.



## ДИФФУЗИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ТРЕХКОМПОНЕНТНЫХ ГАЗОВЫХ СИСТЕМ В КАНАЛАХ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ

При изучении диффузии в многокомпонентных газовых системах (в дальнейшем мы будем вести речь о тройных смесях) необходимо знать, какой режим может наблюдаться при смешении газов – молекулярный или конвективный. Установить это возможно либо через эксперимент, либо расчетом. Однако, учитывая сложности и большие материальные затраты на использование экспериментальных методов (о них шла речь на предыдущей теплофизической школе), был предложен ряд расчетных методик, позволяющих получить необходимую информацию, не прибегая к эксперименту.

### Базовые уравнения конвективной изотермической диффузии

Макроскопическое движение изотермической тройной газовой смеси описывается общей системой уравнений гидродинамики, которая включает в себя уравнения Навье-Стокса, сохранения числа частиц смеси и компонентов и уравнение состояния. Эта система уравнений имеет следующий вид [1–3]:

$$\begin{aligned} \rho \left[ \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + (\bar{u} \nabla \bar{u}) \right] &= -\nabla p + \eta \nabla^2 \bar{u} + \left( \frac{\eta}{3} + \xi \right) \nabla \operatorname{div} \bar{u} + \rho \bar{g}; \\ \frac{\partial n}{\partial t} + \operatorname{div}(n \bar{v}) &= 0, \quad \frac{\partial c_i}{\partial t} + \bar{v} \nabla c_i = -\operatorname{div} \bar{j}_i; \\ \bar{j}_1 &= -(D_{11}^* \nabla c_1 + D_{12}^* \nabla c_2), \quad \bar{j}_2 = -(D_{21}^* \nabla c_1 + D_{22}^* \nabla c_2); \\ \rho &= \rho(c_1, c_2, p), \quad T = \operatorname{const}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\bar{u} = \frac{\rho_1 \bar{u}_1 + \rho_2 \bar{u}_2 + \rho_3 \bar{u}_3}{\rho}$ ,  $\bar{v} = \frac{n_1 \bar{u}_1 + n_2 \bar{u}_2 + n_3 \bar{u}_3}{n}$  – среднемассовая и среднечисловая скорость тройной смеси соответственно;  $\rho$  – плотность;  $p$  – давление;  $\bar{g}$  – ускорение силы тяжести;  $\eta$  и  $\xi$  – коэффициенты сдвиговой и объемной вязкости;  $j_i$ ,  $c_i$  – плотность диффузионного потока и концентрация  $i$ -го компонента;  $D_{ij}^*$  – практические коэффициенты диффузии.

При решении системы уравнений (1) применялся метод малых возмущений [1, 2]. Учитывая, что при  $L \gg r$  ( $L$  – длина диффузионного канала,  $r$  – радиус) различия между возмущениями среднечисловой  $\bar{v}$  и среднемассовой  $\bar{u}$  скоростей в уравнении Навье-Стокса будут несущественны [3], окончательная система уравнений гравитационной концентрационной конвекции для возмущенных значений в безразмерных величинах примет вид [2]:

$$\begin{aligned} P_{22} \frac{\partial c_1}{\partial t} - (\bar{v} \bar{v}) &= \tau_{11} \nabla^2 c_1 + \frac{A_2}{A_1} \tau_{12} \nabla^2 c_2; \\ P_{22} \frac{\partial c_2}{\partial t} - (\bar{v} \bar{v}) &= \frac{A_1}{A_2} \tau_{21} \nabla^2 c_1 + \nabla^2 c_2; \\ \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} &= -\nabla p + \nabla^2 \bar{u} + (R_1 \tau_{11} c_1 + R_2 c_2) \bar{v}, \quad \operatorname{div} \bar{v} = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $P_{ii} = \nu / D_{ii}^*$  – диффузионное число Прандтля;  $R_i = g \beta_i A_i d^4 / \nu D_{ii}^*$  – парциальное число Рэлея;  $\tau_{ij} = D_{ij}^* / D_{22}^*$  – параметры, определяющие соотношение между практическими коэффициентами диффузии.

Принимая, что возмущения зависят от времени по закону:

$$\{\bar{u}, \bar{v}, p, c_i\} \approx \exp(-\lambda t), \quad (3)$$

где  $\lambda$  – временной декремент возмущений, можно найти критические соотношения для парциальных чисел Рэлея  $R_i$  (критических градиентов концентраций) [1–3].

### Линия монотонной устойчивости для плоского вертикального канала с массонепроницаемыми стенками

Рассмотрим задачу об устойчивости для плоского вертикального канала, когда скорость и поток вещества на границах обращаются в нуль [1]:  $u = 0, \frac{\partial c_1}{\partial x} = 0, \frac{\partial c_2}{\partial x} = 0, x = \pm 1$ .

Подставляя решение (3) в (2) и учитывая, что смена режимов наступает при условии  $\lambda = 0$ , а также пренебрегая возмож-

ными возмущениями давления, так как время релаксации давления много меньше времени релаксации концентрации, получим систему уравнений [1, 3]:

$$\tau_{11} \frac{\partial^2 c_1}{\partial x^2} + \frac{A_2}{A_1} \tau_{12} \frac{\partial^2 c_2}{\partial x^2} + u = 0; \quad \frac{A_1}{A_2} \tau_{21} \frac{\partial^2 c_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c_2}{\partial x^2} + u = 0; \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + R_1 \tau_{11} c_1 + R_2 c_2 = 0.$$

Решая эту систему, определим собственные функции  $u$  и  $c_i$  в следующем виде:

$$u = \frac{\text{sh}\gamma x}{\text{sh}\gamma} - \frac{\sin \gamma x}{\sin \gamma}; \quad c_i = -\frac{K_i}{\gamma^4} \left( \frac{\text{sh}\gamma x}{\text{sh}\gamma} + \frac{\sin \gamma x}{\sin \gamma} \right),$$

где  $\gamma^4 = K_1 R_1 \tau_{11} + K_2 R_2$ ;

$$a \quad K_1 = \frac{\left(1 - \frac{A_2}{A_1} \tau_{12}\right)}{(\tau_{11} - \tau_{12} \tau_{21})}; \quad K_2 = \frac{\left(\tau_{11} - \frac{A_1}{A_2} \tau_{21}\right)}{(\tau_{11} - \tau_{12} \tau_{21})}. \quad (5)$$

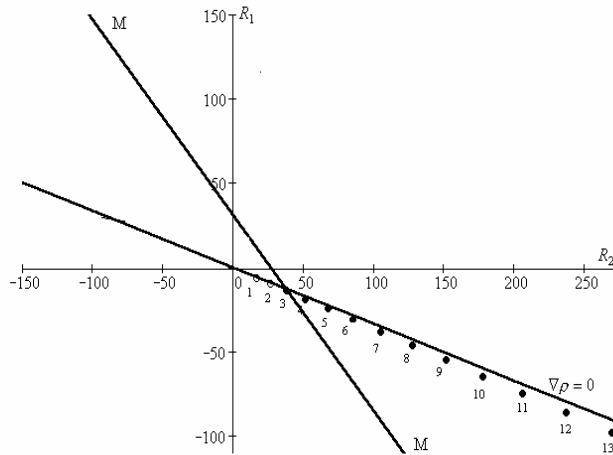
Критические числа Рэлея для нечетных решений имеют вид [1]:

$$\gamma_1 = 2,365; \quad \gamma_3 = 5,498; \quad \gamma_5 = 8,639; \quad R_1 = 31,29; \quad R_3 = 931,8; \quad R_5 = 5570.$$

Линия монотонной  $MM$  неустойчивости определяется следующей формулой:

$$\tau_{11} \left(1 - \frac{A_2}{A_1} \tau_{12}\right) R_1 + \left(\tau_{11} - \frac{A_1}{A_2} \tau_{21}\right) R_2 = [\gamma]^4 (\tau_{11} - \tau_{12} \tau_{21}).$$

Это уравнение дает на плоскости чисел Рэлея ( $R_1, R_2$ ) прямую  $MM$ , разделяющую области устойчивой диффузии (ниже линии  $MM$ ) и диффузионной неустойчивости (выше этой линии) (рис. 1).



**Рис. 1** Области устойчивой и неустойчивой диффузии для системы **0,4 He + 0,6 Ar – N<sub>2</sub>** при **T = 298 К**:

$MM$  – нейтральная линия монотонных возмущений;  $\nabla \rho = 0$  – линия нулевого градиента плотности

### Критические уравнения для бесконечного цилиндра

В настоящее время большое внимание уделяется рассмотрению возникновения конвекции в каналах круглого, кольцевого, эллиптического и прямоугольного сечений в вертикальном слое жидкости (газа).

Определим формулу нейтральной линии монотонных возмущений для бесконечного цилиндра. Полагая, что  $v_x = v_y = 0$ ,  $u_x = u_y = 0$ ,  $u_z = u(x, y)$ ,  $v_z = v(x, y)$ ,  $c_i = c_i(x, y)$ ,  $\nabla p = 0$  [1],  $L \gg r$ , перепишем систему уравнений (2) в виде:

$$\nabla^2 u + R_1 \tau_{11} c_1 + R_2 c_2 = 0; \quad \tau_{11} \nabla^2 c_1 + \frac{A_2}{A_1} \tau_{12} \nabla^2 c_2 + u = 0; \quad (6)$$

$$\frac{A_1}{A_2} \tau_{21} \nabla^2 c_1 + \nabla^2 c_2 + u = 0; \quad \text{div} u = 0.$$

На границах канала возмущения скорости и поток вещества обращаются в нуль:

$$\text{при } r = \pm 1 \quad u = 0, \quad \frac{\partial c_i}{\partial r} = 0, \quad i = 1, 2. \quad (7)$$

Решая систему уравнений (6) с граничными условиями (7) в цилиндрической системе координат, найдем профили скорости и концентраций, соответствующие критическим движениям:

$$u = \left[ \frac{J_n(\gamma r)}{J_n(\gamma)} - \frac{I_n(\gamma r)}{I_n(\gamma)} \right] \cos n\varphi; \quad c_i = \frac{K_i}{\gamma^2} \left[ \frac{J_n(\gamma r)}{J_n(\gamma)} + \frac{I_n(\gamma r)}{I_n(\gamma)} \right] \cos n\varphi.$$

Критические числа Рэлея  $R = \gamma^4$  определяются, как корни трансцендентного уравнения:  $\frac{J_n'(\gamma)}{J_n(\gamma)} + \frac{I_n'(\gamma)}{I_n(\gamma)} = 0$ . Численное решение трансцендентного уравнения дает следующие значения:

$$\gamma_1 = 2,871; \gamma_2 = 4,259; \gamma_3 = 5,541; \gamma_4 = 6,6771; \dots$$

и, соответственно, критические числа Рэлея:

$$R_1 = 67,95; R_2 = 329,1; R_3 = 942,5; R_4 = 2102.$$

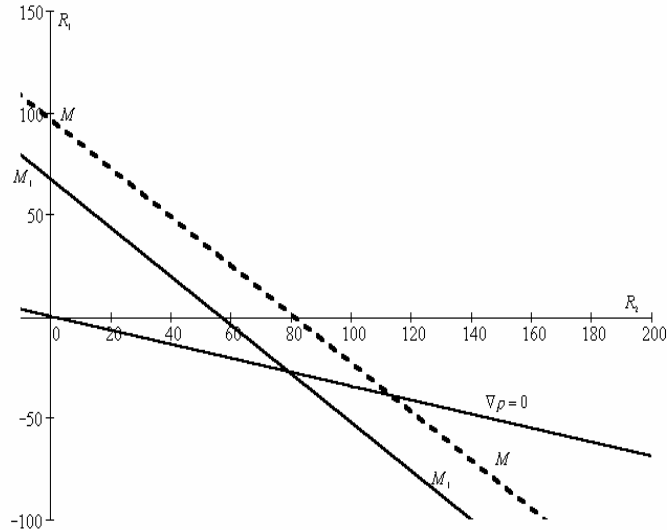
Для нахождения линии монотонных возмущений умножим первое уравнение системы (6) скалярно на  $\bar{u}$  и проинтегрируем по сечению цилиндра:

$$\int \bar{u} \nabla^2 \bar{u} dS + R_1 \tau_{11} \int u c_1 dS + R_2 \int u c_2 dS = 0. \quad (8)$$

Подставив в (8) выражения для распределения скорости и концентраций и проведя операцию интегрирования, получим:

$$\tau_{11} \left( 1 - \frac{A_2}{A_1} \tau_{12} \right) R_1 + \left( \tau_{11} - \frac{A_1}{A_2} \tau_{21} \right) R_2 = \gamma^4 (\tau_{11} - \tau_{12} \tau_{21}). \quad (9)$$

На рис. 2 представлено взаимное расположение линий монотонной неустойчивости и нулевого градиента плотности для плоской щели с массопроницаемыми стенками и для бесконечного цилиндра с массонепроницаемыми стенками. Переход к цилиндрическому каналу с массонепроницаемыми стенками смещает линию монотонной неустойчивости с 97 до 67,95 (эти числа представляют собой значения  $R_1$  при  $R_2 = 0$ ).



**Рис. 2** Линии монотонных возмущений для системы **0,475 He + 0,525 Ar – N<sub>2</sub>** при **T = 298 К**:

$M_1 M_1$  – для бесконечного цилиндра с массонепроницаемыми стенками;  
 $MM$  – для плоской щели с массопроницаемыми стенками;  $\nabla \rho = 0$  – линия нулевого градиента плотности

### Условия и параметры возникновения аномальной диффузии в ограниченном цилиндрическом канале

Экспериментальные исследования проводились с диффузионным каналом конечной длины, в котором существенны трехмерные движения. В статье [4] нами было определено распределение концентрации по длине ограниченного цилиндрического канала, которое имеет вид:

$$c_i = \frac{11K_i(h^2 - z^2)(5h^2 - z^2)\cos n\varphi}{248\alpha^2(k^2 + \alpha^2)} \left[ \alpha^2 \frac{J_n(kr)}{J_n(k)} + \frac{I_n(\alpha r)}{\alpha J_n(\alpha)} \left\{ n(\alpha^2 + k^2) - \alpha^2 k \frac{J'_n(k)}{J_n(k)} \right\} - (k^2 + \alpha^2)r^n \right],$$

где  $\alpha^2 = \frac{153}{62h^2}$ ;  $i = 1, 2$ ;  $h = L/d$  – геометрический параметр, характеризующий устойчивость;  $d$  – диаметр канала;  $L$  – длина канала.

Линия монотонной неустойчивости при граничных условиях аналогичных (7) была определена в виде:

$$\int \bar{u} \nabla^2 \bar{u} dV + R_1 \tau_{11} \int u_z c_1 dV + R_2 \int u_z c_2 dV = 0. \quad (10)$$

Линия монотонной *ММ* неустойчивости, полученная по формуле (10), располагается на плоскости чисел Рэлея аналогично линии монотонной неустойчивости для бесконечного цилиндра. Критическое число Рэлея, определяемое формулой (10) при  $R_2 = 0$  и  $n = 1$ , например для системы  $0,8622 \text{ Н}_2 + 0,1378 \text{ СН}_4 - \text{Н}_2$ , составило 68,5. Это значение достаточно хорошо согласуется с числом, приведенным для вертикального цилиндра в работе [1] ( $R_{кр} = 67,95$ ).

В заключение можно сказать, что геометрия канала влияет на процессы устойчивости. Для цилиндрического канала критическое число Рэлея составляет 67,95, а для щелевого – 97. Переход к граничным условиям, предполагающим отсутствие переноса потока вещества через стенки щелевого диффузионного канала, смещает критическое число Рэлея до 31,29.

#### Список литературы

- 1 Гершуни, Г.З. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости / Г.З. Гершуни, Е.М. Жуховицкий. – М. : Наука, 1972. – 392 с.
- 2 Косов, В.Н. О диффузионной неустойчивости в изотермических трехкомпонентных газовых смесях / В.Н. Косов, В.Д. Селезнев, Ю.И. Жаврин // Теплофизика и аэромеханика. – 2000. – Т. 7, № 1. – С. 127 – 135.
- 3 Косов, В.Н. Аномальное возникновение свободной гравитационной конвекции в изотермических тройных газовых смесях / В.Н. Косов, В.Д. Селезнев. – Екатеринбург : УрО РАН, 2004. – 151 с.
- 4 Аномальная гравитационная конвекция трехкомпонентной газовой смеси в вертикальном цилиндре конечной высоты / Ю.И. Жаврин, В.Д. Селезнев, И.В. Поярков, О.В. Федоренко // Вестник ТГТУ. – 2005. – Т. 11, № 1А. – С. 94 – 102.

*И.Г. Коршунов<sup>1</sup>, А.А. Уймин<sup>2</sup>*

1 – Институт теплофизики УрО РАН (г. Екатеринбург),

2 – Уральский государственный горный университет (г. Екатеринбург)

#### **ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТЬ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ КОНТАКТНЫХ ЗОН БИМЕТАЛЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ УДАРНЫМ НАГРУЖЕНИЕМ МЕТАЛЛОВ КОНТАКТНЫХ ПАР**

Выполнены измерения температуропроводности контактных зон биметаллов, полученных высокоэнергетическим ударным нагружением металлов контактных пар (сварка взрывом). При изготовлении биметаллов использовались Nb, Ta, W, Mo, Ti, Zr, Hf, Fe, Ni.

Режимы соударения металлических пластин были такими, что вблизи границы раздела сред возникали давления порядка  $10\text{--}12 \cdot 10^9$  Па, а температуры достигали 2500–3500 К. В этих условиях в течение нескольких микросекунд происходило формирование контактных зон, толщина которых для исследованных биметаллов составляла от 30 до 100 мкм.

Измерения температуропроводности контактных зон и металлов контактных пар выполнялись при температуре 300 К бесконтактным способом, основанным на методе термомодуляционной лазерной эллипсометрии. Погрешность этих измерений не превышала 5 %.

Измерения температуропроводности контактных зон, результаты исследования строения этих зон, а также данные о теплоемкости и плотности металлов контактных пар позволили рассчитать теплопроводность контактных зон.

В результате было установлено, что контактные зоны имеют низкую тепло- и температуропроводность по сравнению с металлами контактных пар. Различие достигает десяти и более раз.

Особенностью исследованных биметаллических систем является то, что металлы контактных пар обладают полной взаимной растворимостью как в твердом, так и в жидком состояниях. Однако низкую тепло- и температуропроводность контактных зон нельзя объяснить в предположении, что контактные зоны представляют собой твердые растворы замещения металлов контактных пар.

Выполненные нами исследования показали, что контактные зоны, формирующиеся при взрыве, представляют собой сильно разупорядоченные структуры, причем в процессе формирования этих зон происходила аморфизация вещества. В результате этого энергетические характеристики электронов проводимости в контактных зонах биметаллов, полученных сваркой взрывом, и в металлах контактных пар значительно различаются.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ

(грант № 07-08-00750-а).

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕФТЕПРОДУКТОВ ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

По прогнозам специалистов, в мире происходит уменьшение запасов нефти. В связи с этим основная задача нефтеперерабатывающего комплекса заключается в повышении эффективности технологии переработки нефти, увеличении выхода светлых нефтепродуктов. На нефтеперерабатывающих заводах для увеличения объема светлых фракций в основном используются каталитический крекинг, гидрокрекинг, термический крекинг [1].

Российскими и зарубежными исследователями предлагаются различные способы и технологии, позволяющие увеличить выход светлых нефтепродуктов. Основными технологиями переработки нефти и нефтепродуктов являются перегонка и крекинг. Воздействовать на кинетику этих процессов можно химическими веществами (катализаторами, поверхностно-активными веществами – ПАВ, присадками и т.д.) и физическими полями (тепловыми, кавитационными, электромагнитными и т.д.). В результате такого вмешательства изменяется радиус ядра и толщина адсорбционно-сольватной оболочки сложной структурной единицы, которая является элементом нефтяной дисперсной системы.

Воздействие на нефть и ее остатки с помощью химических веществ приводит к существенному возрастанию себестоимости конечного продукта, ускоренному износу ректификационных колонн и является сложно регулируемым процессом. В настоящее время особое внимание многие исследователи уделяют методам интенсивной обработки нефти с целью увеличения выхода светлых фракций при ее перегонке, снижения содержания серы.

Технология интенсивного разделения углеводородного сырья (ТИРУС) основана на термомеханическом воздействии на нефть, инициирующем низкотемпературный крекинг в условиях кавитации и ультразвуковых колебаний без использования катализаторов [2]. В аппарате для проведения ТИРУС на нагретое до подкритичной температуры сырье накладываются резонансные колебания, образующиеся за счет движения потока сырья, что приводит к разрыву связей в молекулах, их крекингу и, как следствие, увеличению выхода светлых целевых продуктов.

В основе технологии, получившей название «Висбрекинг-ТЕРМАКАТ», лежит мягкий термический крекинг, интенсифицированный кавитационно-акустическим воздействием на реакционные среды [3]. Подвод энергии осуществляется методом кавитационно-акустического воздействия, вносящим изменения в гидродинамику и дисперсионную стабильность жидких сред, что по-разному влияет на разные стадии процесса – заметно интенсифицирует одни (деструкция) и резко замедляет другие (коксообразование).

Применение кавитационно-акустического воздействия позволяет подавить процессы коксообразования и интенсифицировать процессы деструкции за счет воздействия на микрогидродинамику жидких реакционных сред. В качестве генератора кавитации используются кавитационно-акустические насосы с регулируемой энергетикой кавитационного воздействия. Использование этого технологического приема позволило значительно снизить температуру крекинга – до 410 °С и ниже, избежать нежелательного закоксовывания оборудования, а также снизить давление с 2,5 до 0,5–0,2 МПа и вдвое уменьшить металлоемкость оборудования [3].

В технологии «SonoCracking» компании SulphCo ([http:// www.sulphco.com/index.asp](http://www.sulphco.com/index.asp)) используется мощный ультразвук для того, чтобы изменить молекулярные структуры в воде и углеводородах. Технология использует энергию мощного ультразвука для обработки смеси сырой нефти и воды в соединении с катализаторами, разработанными компанией SulphCo. Результатом применения этой технологии является снижение содержания серы в нефти и разрыв цепочек длинномерных молекул, увеличение содержания светлых фракций.

Энергетическое воздействие на нефть и нефтепродукты позволяет увеличить выход легколетучих фракций при ее перегонке. Применяя импульсное энергетическое воздействие, из тяжелой нефти можно получить 20–30 % бензина, 40–50 % дизельного топлива, 20–30 % мазута, битума и других тяжелых товарных продуктов. Кавитационная обработка ускоряет диффузию нефти в полости парафина, интенсифицирует процесс его разрушения. Ускорение растворения парафина идет за счет интенсификации перемешивания нефти на границе нефть – парафин и действия импульсов давления, которые как бы разбрызгивают частицы парафина. Кавитация разрывает непрерывную цепочку, разрушая связи между отдельными частями молекул, влияет на изменение структурной вязкости, т.е. на временный разрыв Ван-дер-ваальсовых связей. Под воздействием кавитации большой интенсивности на протяжении длительного времени нарушаются С–С-связи в молекулах парафина, вследствие чего происходят изменения физико-химического состава (уменьшение молекулярного веса, температуры кристаллизации и др.) и свойств нефтепродуктов (вязкости, плотности, температуры вспышки и др.). В процессе импульсной кавитационной обработки нефти и нефтепродуктов энергия, выделяющаяся при схлопывании кавитационных пузырьков, используется для разрыва химических связей между атомами больших молекул углеводородных соединений [4 – 8].

Для разрыва связей в молекулах углеводородных соединений необходимо обеспечить на сложную многокомпонентную систему, которой является нефть и нефтепродукты, многофакторное энергетическое воздействие в импульсной форме. Такое воздействие реализуется в роторных импульсных аппаратах (РИА) [9]. Энергия диссоциации связи С–Н колеблется в зависимости от молекулярной массы и структуры молекулы в пределах 322 – 435 кДж/моль, энергия диссоциации связи С–С – 250 – 348 кДж/моль [10]. При разрыве связи С–Н от углеводородной молекулы отрывается водород, при разрыве связи С–С углеводородная молекула разрывается на две неравные части. При кавитационной обработке углеводородного сырья происходит деструкция молекул, вызванная микрокрекингом молекул и процессами ионизации. В результате протекания этих процессов в системе накапливаются «активированные» частицы: радикалы, ионы, ионно-радикальные образования [7].

РИА используются для обработки таких систем, как «жидкость – жидкость», «жидкость – твердое тело» и «газ – жидкость» за счет широкого спектра факторов воздействия:

- механическое воздействие на частицы гетерогенной среды, заключающееся в ударных, срезающих и истирающих нагрузках и контактах с рабочими частями РИА;
- гидродинамическое воздействие, выражающееся в больших сдвиговых напряжениях в жидкости, развитой турбулентности, пульсациях давления и скорости потока жидкости;
- гидроакустическое воздействие на жидкость за счет мелкомасштабных пульсаций давления, интенсивной кавитации, ударных волн и нелинейных акустических эффектов.

Нами проведены экспериментальные исследования по импульсной многофакторной энергетической обработке мазутов различных нефтеперерабатывающих заводов: Карабашский НПЗ, Нижнекамский НПЗ, Шугуровский НПЗ. Исходные и конечные параметры мазутов после обработки в роторном импульсном аппарате приведены в табл. 1.

Многофакторное импульсное энергетическое воздействие на мазуты позволяет снизить вязкость на 20 – 30 %, увеличить температуру вспышки на 5 – 10 %. После кавитационной обработки в РИА в мазуте образуется до 35 % дизельного топлива (температура отгонки 250 – 290 °С).

**Таблица 1**

| Производитель мазута | Параметры мазута   |          |              |                         |          |              |                                   |          |              |
|----------------------|--|----------|--------------|-------------------------|----------|--------------|-----------------------------------|----------|--------------|
|                      | Время истечения через вискозиметр ВЗ-246 (ГОСТ 9070–75), с, при $t = 60^{\circ}\text{C}$ |          |              | Температура вспышки, °С |          |              | Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$ |          |              |
|                      | Исходные   | Конечные | $\Delta, \%$ | Исходные                | Конечные | $\Delta, \%$ | Исходные                          | Конечные | $\Delta, \%$ |
| Карабашский НПЗ      | 155  | 90       | 42           | 120                     | 127      | 5            | 925                               | 920      | 0,5          |
| Шугуровский НПЗ      | 38   | 23       | 39           | 105                     | 115      | 9            | 915                               | 915      | 0            |
| Нижнекамский НПЗ     | 165  | 120      | 25           | 145                     | 135      | - 7          | 920                               | 920      | 0            |

Экспериментальные исследования показали, что обработанная в РИА нефть начинает перегоняться под атмосферным давлением при температуре ниже на 10°С и более, чем необработанная нефть, 50 % обработанной нефти перегоняется при температуре 265 °С, а 50 % необработанной нефти перегоняется при температуре 328 °С под атмосферным давлением (табл. 2).

**Таблица 2**

| Сырая нефть                | Температура начала конденсации паров, °С | Выход конденсата, объемная доля при температуре, °С |      |      |      |      |
|----------------------------|--|---|------|------|------|------|
|                            |  | 10 %  | 20 % | 30 % | 40 % | 50 % |
| Необработанная             | 75                                       | 134   | 189  | 237  | 286  | 328  |
| Обработанная               | 65                                       | 110   | 161  | 196  | 241  | 265  |
| $\Delta, ^{\circ}\text{C}$ | 10                                       | 24  | 28   | 41   | 45   | 63   |

Энергия, вводимая в объем обрабатываемого мазута с учетом затрат энергии на подачу мазута в РИА центробежным насосом, составляла около 200 – 350 кДж/моль в зависимости от молекулярной массы мазута разных производителей. Удельные затраты энергии при обработке мазута соотносятся с энергией диссоциации связей в молекулах углеводородов, а значит, имеются все условия для разрыва молекул углеводородного топлива за счет импульсного многофакторного воздействия.

#### Список литературы

- 1 Каминский, Э.Ф. Глубокая переработка нефти: технологический и экологический аспекты / Э.Ф. Каминский, В.А. Хавкин. – М. : Издательство Техника ; ООО «ТУМА ГРУПП», 2001. – 384 с.
- 2 Золотухин, В.А. Новая технология для переработки тяжелой нефти и осадков нефтеперерабатывающих производств / В.А. Золотухин // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2004. – № 10. – С. 8 – 11.
- 3 Применение процесса «Висбрекинг-ТЕРМАКАТ» в структуре действующих НПЗ / А.К. Курочкин, К.Н. Козлов, А.В. Курочкин, А.А. Курочкин // Нефтепереработка и нефтехимия-2005 : материалы секции Д VI конгресса нефтегазопромышленников России «Нефтегазовый комплекс – реальность и перспективы». – Уфа, 2005. – С. 70 – 71.

4 Пат. 2078116 РФ. Способ крекинга нефти и нефтепродуктов и установка для его осуществления / Кладов А.Ф. – 27.04.1997.

5 Пат. 2149886 РФ. Способ обработки нефти, нефтепродуктов, углеводородов / Быков И.Н., Бембель В.М., Колмаков В.А. и др. – 27.05.2000.

6 Деструкция углеводородов в кавитационной области в присутствии электрического поля при активации водными растворами электролитов / А.С. Бесов, К.Ю. Колтунов, С.О. Брулев и др. // Письма в ЖТФ. – 2003. – Т. 29. – Вып. 5. – С. 71 – 77.

7 Влияние кавитационного воздействия на углеводородное топливо / А.Ф. Немчин, В.А. Михайлик, Г.Т. Тодорашко, Е.В. Щепкин // Пром. теплотехника. – 2002. – Т. 24, № 6. – С. 60 – 63.

8 Kenneth S. Suslick. The Chemical Effects of Ultrasound // Scientific American. – 1989. – February. – P. 80 – 86.

9 Промтов, М.А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика / М.А. Промтов – М. : Машиностроение-1, 2001. – 260 с.

10 Пилипенко, А.Т. Справочник химика / А.Т. Пилипенко. – Киев : Наукова думка, 1987. – 407 с.

*М.М. Сафаров, Ш.А. Аминов*

Таджикский технический университет им. М.С. Осими (г. Душанбе)

### **ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРАЗИНА И ЕГО ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОКИСНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ И ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ**

Гидразинная обработка воды может способствовать предотвращению образования железистых и медистых отложений на поверхностях нагрева парогенераторов [1] (табл. 1). В работе [1] в качестве примера приведено снижение скорости образования отложений на поверхностях нагрева парогенератора высокого давления при обычной его эксплуатации и при гидразинной обработке питательной воды. Окислы железа и меди, восстановленные гидразином до закиси железа и металлической меди (формы низшей валентности), могут быть удалены в виде шлама при продувке.

**Таблица 1**

| Тепловая нагрузка, кВт/м <sup>2</sup> | Давление, Па 10 <sup>-5</sup> | Температура, °С | Валентность железа | рН   | Содержание гидразина, мг/кг | Скорость железистого накаливания |                            |
|---------------------------------------|-------------------------------|-----------------|--------------------|------|-----------------------------|----------------------------------|----------------------------|
|                                       |                               |                 |                    |      |                             | мг/(см <sup>2</sup> ·ч)          | мг/см <sup>2</sup> в месяц |
| 350                                   | 110                           | 316             | 2                  | 10,7 | 0                           | 3,8                              | 20,0                       |
| 700                                   | 110                           | 316             | 2                  | 10,7 | 0                           | 11,3                             | 61,0                       |
| 350                                   | 110                           | 316             | 2                  | 10,7 | 5                           | 0,5                              | 2,5                        |
| 700                                   | 110                           | 316             | 2                  | 10,7 | 5                           | 1,0                              | 5,0                        |
| 350                                   | 40                            | 249             | 2                  | 10,7 | 5                           | 0,3                              | 1,5                        |
| 350                                   | 75                            | 290             | 2                  | 10,7 | 5                           | 0,1                              | 0,5                        |
| 350                                   | 180                           | 355             | 2                  | 10,7 | 5                           | 0,2                              | 1,0                        |
| 350                                   | 110                           | 316             | 3                  | 10,7 | 5                           | 0,3                              | 1,5                        |
| 350                                   | 110                           | 316             | 2                  | 7,5  | 5                           | 0,5                              | 2,5                        |
| 350                                   | 110                           | 316             | 3                  | 7,5  | 5                           | 0,2                              | 1,0                        |

Удаление окислов железа с поверхности питательного тракта зависит, в первую очередь от содержания гидразина в питательной воде, температуры среды, а также структуры и состава продуктов коррозии на поверхности трубопроводов. Рыхлые и непрочные связанные с металлом окислы железа удаляются быстрее, плотные отложения восстанавливаются гидразином очень медленно. Степень загрязнения питательной воды окислами железа, удаляемыми из питательного тракта и экономайзера, также зависит от перечисленных выше факторов и может быть значительной при больших дозировках гидразина, сильной загрязненности питательного тракта, в особенности, рыхлыми, плохо связанными с поверхностью металла окислами железа. Образование защитной пленки на поверхности металла под действием гидразина может произойти только после полного удаления продуктов коррозии с питательных трубопроводов и экономайзерных поверхностей нагрева. Скорость образования этой пленки определяется избытком гидразина, температурой и величиной рН.

Перед началом гидразинной обработки для предотвращения железистых отложений необходимо уменьшить содержание продуктов коррозии в питательной воде и ее составляющих, а также в котловой воде при помощи известных мероприятий (противокоррозионные покрытия баков, фильтров, трубопроводов, деаэраторов; периодическая отмывка катионитов и анионитов от накопившихся в них продуктов коррозии; регулярная продувка баков и деаэраторов из нижних точек; организация отсосов неконденсирующихся газов теплообменных аппаратов; тщательная термическая деаэрация питательной воды; обработка подаваемого на производство пара октадециламином, а питательной воды аммиаком и т.д.). Для удаления продуктов коррозии из котловой воды необходимо осуществлять периодическую и непрерывную продувки парогенератора. Особое значение имеет усиление непрерывной и периодической продувок во время начального периода гидразинной обра-

ботки. Непрерывную продувку увеличивают до тех пор, пока содержание продуктов коррозии в котловой воде не будет превышать обычных эксплуатационных значений, а периодическую продувку из всех нижних точек производят не реже одного раза в смену.

Для предотвращения или ослабления «прикипания» продуктов коррозии к поверхности нагрева используют гидразин-гидрат или гидразинсульфат. Эти реагенты можно дозировать в аккумуляторные баки деаэраторов, во всасывающий коллектор питательных насосов, в питательную магистраль после конденсатных насосов, а также непосредственно в барабан парогенератора, причем каждый из этих способов имеет свои преимущества. Так, например, при вводе во всасывающий коллектор питательных насосов гидразин хорошо перемешивается с питательной водой. При вводе гидразина в аккумуляторный бак деаэратора увеличивается продолжительность контакта гидразина с окислами металлов, что особенно важно, когда в питательной воде присутствуют органические вещества, резко замедляющие реакции с гидразином. В момент насыщения системы гидразином его дозируют для предотвращения накипеобразования одновременно в питательную и котловую воду. Дополнительный ввод гидразина в котловую воду наиболее желателен при наличии окислителей в питательной воде и сильной загрязненности питательного тракта. Схемы приготовления растворов гидразингидрата и гидразинсульфата и непрерывного дозирования их в питательную воду описаны в [1].

Для предотвращения выделения окислов железа на поверхности нагрева гидразин дозируют из расчета содержания в питательной воде не только кислорода, нитритов и нитратов, но и окислов меди и железа.

Дозировку гидразина на ТЭЦ, с учетом значительной добавки умягченной воды на них и большого количества конденсата, возвращаемого с производства, при повышенном содержании окислов железа в питательной воде целесообразно поддерживать равной 0,10 – 0,15 мг/кг. На конденсационных электростанциях или электростанциях, работающих с добавками обессоленной воды, дозировку гидразина можно уменьшить до 0,05 – 0,10 мг/кг. В парогенераторах с естественной циркуляцией гидразин дозируют в таких количествах, чтобы обеспечить постоянный избыток его в котловой воде примерно 0,01 – 0,03 мг/кг. Если гидразин в котловой воде отсутствует, то, следовательно, еще не произошло «насыщение» системы гидразином и нельзя рассчитывать на успешное предотвращение образования окисных отложений.

Учитывая летучесть гидразина и способность его сравнительно быстро разлагаться при высоких температурах, для насыщения системы и поддержания постоянного избытка гидразина в котловой воде во время начального периода обработки концентрацию гидразина в питательной воде увеличивают до 300 мкг/кг, но не более во избежание усиленного загрязнения котловой воды продуктами коррозии как из питательного тракта, так и из экранных труб. При этом возможно забивание экранных труб образовавшимся шламом и увеличение выноса продуктов коррозии паром. После насыщения системы гидразином избытки его в питательной воде можно сократить, поддерживая постоянно небольшой избыток гидразина в котловой воде. Для создания необходимого избытка гидразина в котловой воде содержание его в питательной воде перед экономайзером должно быть не меньше значений, указанных ранее.

Эффективность обработки контролируют путем вырезки образцов парогенераторных труб и исследования состояния внутренней их поверхности. Количество отложений определяют механическим удалением их с поверхности трубы или катодным травлением.

Для барабанных парогенераторов оценку скорости образования железистоокисных отложений производят также по балансу продуктов коррозии

$$Q_{п.в.} C_{п.в.} = Q_{п} C_{п} + q C_{к.в.} + A,$$

где  $Q_{п.в.}$  – расход питательной воды, т/ч;  $Q_{п}$  – расход пара, т/ч;  $q$  – размеры продувки, т/ч;  $C_{п.в.}$  – содержание продуктов коррозии в питательной воде, мг/кг;  $C_{п}$  – содержание продуктов коррозии в паре, мг/кг;  $C_{к.в.}$  – содержание продуктов коррозии в котловой воде, мг/кг;  $A$  – скорость образования отложений в парогенераторе, г/ч. При этом следует учитывать, что паром обычно уносится около 10 %, с продувкой выводится 50 – 20 %, в парогенераторе остается вследствие образования отложений или шлама 50 – 70 % продуктов коррозии, поступающих в парогенератор. При налаженной гидразинной обработке питательной или котловой воды эти соотношения резко изменяются. Основная часть (более 90%) продуктов коррозии удаляется с продувкой в виде тонко-дисперсного шлама. Для измерения теплопроводности растворов нами использованы методы монотонного разогрева Е.С. Платунова [3] (Актюбинский завод). Методы монотонного теплового режима основываются на закономерностях приближенного анализа нелинейного уравнения теплопроводности. При этом под монотонным тепловым режимом понимается плавный разогрев (охлаждение) тела в широком диапазоне измерения температуры со слабо переменным полем скоростей внутри образца [2]. Эти методы являются обобщением квазистационарных методов на случай переменных теплофизических параметров [ $\lambda = \lambda(t)$ ;  $a = a(t)$ ;  $C_p = C_p(t)$ ] и скорости нагревания (охлаждения)  $b = f(x, \tau)$ . Они позволяют из одного опыта получить температурную зависимость исследуемого образца и носят иногда название динамических методов. Метод монотонного разогрева используется для измерения теплопроводности и теплоемкости жидкостей, растворов, твердых тел, сыпучих материалов и др. [2 – 4].

#### Список литературы

- 1 Манькина, Н.Н. Физико-химические процессы в пароводяном цикле электростанций / Н.Н. Манькина. – М : Энергия, 1977. – 256 с.
- 2 Платунов, Е.С. Теплофизические измерения в монотонном режиме / Е.С. Платунов. – Л. : Энергия, 1973. – 142 с.
- 3 Мустафаев, Р.А. Метод монотонного нагрева для исследования теплопроводности жидкостей, паров и газов при высоких температурах и давлениях / Р.А. Мустафаев // Сб. по теплофизическим свойствам жидкостей. – М. : Наука, 1973. – С. 112–117.
- 4 Экспериментальная установка для измерения теплопроводности жидкостей методом монотонного разогрева / Х. Маджидов, Е.П. Двойкин, А.И. Богданов, С. Зубайдов, М.М. Сафаров // Приборостроение. – 1989. – Т. 32, № 12. – С. 78–81.



Н.Б. Анкушева, Г. Акылбекова, В.Н. Косов

Казахский национальный педагогический  
университет им. Абая (г. Алматы)

**ВЛИЯНИЕ ПОРИСТОСТИ СРЕДЫ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ МЕХАНИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ ТРЕХКОМПОНЕНТНОЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ ПРИ ДИФФУЗИИ В ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

Если пористая среда заполнена какой-нибудь смесью газов (в изотермических условиях), то при наличии пространственной концентрационной неоднородности смеси в системе может возникнуть конвективное движение. Естественно, что условия возникновения движения будут существенно отличаться (количественно, а может быть, и качественно) от условий возникновения конвекции в сплошной среде. Система уравнений концентрационной гравитационной конвекции в канале со множеством пор для изотермической трехкомпонентной газовой смеси имеет вид [1, 2]:

$$\begin{aligned} \frac{\rho}{\varepsilon} \left( \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \nabla) \vec{u} \right) &= -\nabla p + \rho \vec{g} + \vec{f}; \\ \rho \left( \frac{\partial c_1}{\partial t} + \vec{u} \nabla c_1 \right) &= \rho (D_{11}^* \Delta c_1 + D_{12}^* \Delta c_2); \\ \rho \left( \frac{\partial c_2}{\partial t} + \vec{u} \nabla c_2 \right) &= \rho (D_{21}^* \Delta c_1 + D_{22}^* \Delta c_2); \\ \operatorname{div} \vec{u} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность газовой смеси;  $\vec{u}$  – макроскопическая скорость фильтрации;  $\varepsilon$  – пористость среды (отношение объема пор к объему выделенного элемента среды);  $\vec{f}$  – плотность силы сопротивления;  $D_{11}^*$ ,  $D_{12}^*$ ,  $D_{21}^*$ ,  $D_{22}^*$  – практические коэффициенты диффузии. В отличие от сопротивления движению в сплошной среде, обусловленного наличием вязкого трения между движущимися с разными скоростями слоями жидкости или газа, сопротивление в пористой среде прямо зависит от скорости движения. Плотность силы сопротивления в пористой среде связана со скоростью фильтрации формулой Дарси [1]:

$$\vec{f} = -\frac{\eta}{K} \vec{u}, \quad (2)$$

где  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости жидкости;  $K$  – коэффициент проницаемости.

Так как скорость фильтрации обычно мала, то пренебрежем в (1) квадратичными относительно возмущений членами. Полагая, что плотность зависит от концентрации линейно  $\rho = \rho_0(1 - \beta_1 c_1 - \beta_2 c_2)$ , используя приближение Буссинеска и метод малых возмущений, обезразмеривая систему уравнений относительно масштабов:  $L$  – характерный размер, для случая плоского вертикального канала он принят равным половине ширины слоя;  $D_{22}^*/L$  – скорости;  $A_i L$  – концентрации;  $\rho_0 \nu D_{22}^*/K$  – давления, и считая, что  $u$ ,  $c_1$  и  $c_2$  зависят от времени пропорционально  $e^{-\lambda t}$ , где  $\lambda$  – характеристический декремент, определяющий, будут ли возмущения со временем затухать или нарастать, окончательно получим систему уравнений для безразмерных величин:

$$\begin{aligned} -\lambda \vec{u} &= -\vec{u} + (\tau_{11} R_{p1} c_1 + R_{p2} c_2) \vec{\gamma}; \\ -\lambda P_{22} c_1 &= \tau_{11} \Delta c_1 + \frac{A_2}{A_1} \tau_{12} \Delta c_2 + (\vec{u} \vec{\gamma}); \\ -\lambda P_{22} c_2 &= \frac{A_1}{A_2} \tau_{12} \Delta c_1 + \Delta c_2 + (\vec{u} \vec{\gamma}), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $P_{22} = \nu / D_{22}^*$  – число Прандтля;  $R_{p_i} = \frac{g \beta_i A_i K L^2}{\nu D_{22}^*}$  – парциальное число Рэлея для пористой среды, связанное с парциаль-

ным числом Рэлея для сплошной среды соотношением  $R_{p_i} = R_i \frac{K}{L^2}$ , где  $A_i$  численно равно градиенту концентрации  $i$ -го компонента при равновесных условиях;  $\nabla c_{i0} = -A_i \vec{\gamma}$ ,  $\tau_{ij} = D_{ij}^* / D_{22}^*$  – параметры, определяющие соотношения практических

коэффициентов диффузии.

Если сравнить систему уравнений (3) с соответствующей ей системой уравнений для сплошной среды [1, 2], то увидим, что из первого уравнения системы (3) исчезает лапласиан при  $\vec{u}$ , отвечающий члену с вязкой силой. Замена вязкой силы силой Дарси приводит к понижению порядка системы дифференциальных уравнений. Поэтому число необходимых граничных условий для скорости уменьшается. Так, на границе раздела пористой среды с твердой стенкой должна обращаться в нуль лишь нормальная компонента скорости фильтрации. Касательная же компонента может быть отлична от нуля – это означает, что вдоль границы будет происходить фильтрация.

Решение системы (3) как и в [1] будем искать в виде

$$\{c_1, c_2, u\} = \{c_1^0, c_2^0, u^0\} \sin \left[ (n+1) \frac{\pi}{2} x \right], \quad (4)$$

где  $n = 1, 3, 5, \dots$  – характерные нечетные моды возмущений.

Подставляя (4) в (3) и исключая из него амплитуды концентрации и скорости, получим кубическое уравнение относительно  $\lambda$ :

$$p\lambda^3 + q\lambda^2 + r\lambda + s = 0$$

где

$$\begin{aligned} p &= P_{22}^2, \quad q = P_{22} \left\{ -P_{22} - \left[ (n+1) \frac{\pi}{2} \right] (1 + \tau_{11}) \right\}; \\ r &= \left[ (n+1) \frac{\pi}{2} \right]^4 \tau_{12} \tau_{21} + \left[ (n+1) \frac{\pi}{2} \right]^2 \times \\ &\times (P_{22} \tau_{11} + \tau_{11} + P_{22}) + P_{22} (R_{p1} \tau_{11} + R_{p2}); \\ s &= \left[ (n+1) \frac{\pi}{2} \right]^4 (\tau_{11} - \tau_{12} \tau_{21}) + \left[ (n+1) \frac{\pi}{2} \right]^2 \times \times \left( \left( 1 - \frac{A_2}{A_1} \tau_{11} \right) R_{p1} \tau_{11} + \left( \tau_{11} - \frac{A_1}{A_2} \tau_{21} \right) R_{p2} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Линия монотонных возмущений  $MM$  определяется условием  $s = 0$ , откуда находим границу монотонной устойчивости

$$\tau_{11} \left( 1 - \frac{A_2}{A_1} \tau_{12} \right) R_{p1} + \left( \tau_{11} + \frac{A_1}{A_2} \tau_{21} \right) R_{p2} = \left[ (n+1) \frac{\pi}{2} \right]^2 (\tau_{11} - \tau_{12} \tau_{21}), \quad (6)$$

которая отличается от линии  $MM$  для сплошной среды только степенью в правой части равенства.

На рис. 1 показана плоскость парциальных чисел Рэлея  $R_{p1}$  и  $R_{p2}$ , на нее нанесены линия монотонных возмущений  $MM$  и линия равной плотности  $\nabla \rho = 0$ . Область, где линия равной плотности расположена выше линии  $MM$ , выделена штриховкой. Из рисунка следует, что при многокомпонентной диффузии через пористый канал может наблюдаться неустойчивость механического равновесия.

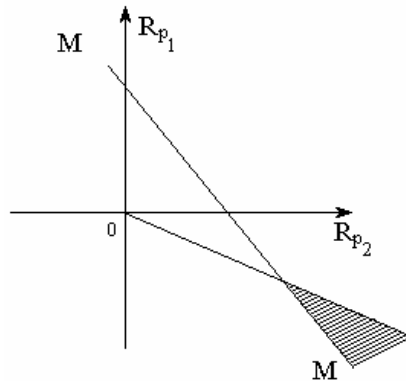


Рис. 1 Граничные линии монотонной неустойчивости  $MM$  и нулевого градиента плотности  $\nabla \rho = 0$

#### Список литературы

**В.А. Езерский<sup>1</sup>, Т.Ф. Ельчищева<sup>2</sup>**

1 – Белостокский политехнический институт (г. Белосток, РП),  
2 – ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

## **ВЕРИФИКАЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ЗАСОЛЕННЫХ СТЕНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ФИЗИКО-СТАТИСТИЧЕСКОГО ПОДХОДА**

В материалах наружных стен зданий промышленных предприятий с солевой производственной средой часто происходит накопление гигроскопических солей. Ввиду хорошей растворимости соли проникают не только в поверхностные слои, но и достаточно равномерно распределяются по толщине стен. При сезонных колебаниях влагосодержания стенового материала из солевых растворов образуются кристаллы безводных солей или кристаллогидраты с теплопроводностью, в несколько раз превышающей теплопроводность скелета материала и в десятки раз – теплопроводность внутрипорового вещества незасоленного материала. В связи с этим наличие солей в пористой структуре приводит к изменению коэффициента теплопроводности стенового материала. Для обеспечения теплотехнической надежности наружных стен в подобных условиях в инженерных расчетах необходимо принимать реальные значения коэффициента теплопроводности засоленного материала.

В работе представлен физико-статистический подход к верификации значений коэффициента теплопроводности кирпичной кладки, содержащей различные соли (44 вида) при значениях массового влаго- и солесодержания, приближенных к реальному эксплуатационному состоянию стен в условиях солевого воздействия в промышленных зданиях.

### **Способ определения коэффициента теплопроводности засоленной кирпичной кладки**

Для оценки характера и степени влияния солей на коэффициент теплопроводности стеновых материалов наиболее эффективно применение метода математического моделирования. Такой подход к исследованию коэффициента теплопроводности кирпичной кладки, засоленной некоторыми солями, впервые предложен в работе [2]. В основу программной модели были положены формулы для расчета обобщенной проводимости А. Миснара [6] и Г.Н. Дульнева [1]. При проведении расчетов приняты следующие факторы, влияющие на коэффициент теплопроводности засоленного стенового материала:

- *физические характеристики стенового материала* – плотность, пористость, коэффициент теплопроводности скелета (плотного вещества материала), сорбционное влагосодержание;
- *физико-химические характеристики исходной кристаллической соли*, внесенной в стеновой материал – плотность и коэффициент теплопроводности кристалла, растворимость и гигроскопичность;
- *физико-химические характеристики соли, кристаллизующейся из раствора* в поровом пространстве материала – плотность и коэффициент теплопроводности кристалла, растворимость и гигроскопичность;
- *физико-химические характеристики растворов солей*, образующихся в поровом пространстве материала в присутствии влаги – плотность, коэффициент теплопроводности, концентрация, давление паров воды над насыщенным и разбавленным раствором, гигроскопичность, теплота испарения воды;
- *физико-химические характеристики паровоздушной смеси*, содержащейся в поровом пространстве засоленного материала – коэффициент теплопроводности сухого воздуха, коэффициент теплопроводности пара за счет диффузии паров воды;
- *влаго- и солесодержание стенового материала*.

В результате вычислений коэффициента теплопроводности  $\lambda$  кирпичной кладки, содержащей шесть выбранных солей с отличающимися свойствами, было установлено, что соли в стеновом материале могут существенно повышать его теплопроводность. Однако в присутствии влаги влияние солей сложно и неоднозначно, т.е. отмечаются как эффекты повышения  $\lambda$ , так и эффекты понижения его величины. По результатам исследований получены статистические зависимости коэффициента теплопроводности стенового материала от влаго- ( $\omega$ ) и солесодержания ( $c$ ). В развитие формулы (1) В.М. Ильинского [5] для расчетов коэффициента теплопроводности влажных стеновых материалов предложена аналитическая зависимость (2), позволяющая рассчитать  $\lambda$  засоленной кирпичной кладки с учетом фазового состава внутрипорового вещества:

$$\lambda = \lambda_0 + \beta\omega, \quad (1)$$

$$\lambda = \lambda_0 + \beta\omega + \gamma(c - \xi\omega), \quad (2)$$

где  $\lambda_0$  – коэффициент теплопроводности материала в сухом состоянии, Вт/(м·°С);  $\beta$ ,  $\gamma$  – коэффициенты приращения теплопроводности, соответственно, на 1 % влажности и 1 % солесодержания;  $\xi$  – коэффициент смещения начального значения солесодержания на 1 % влажности.

Однако следует отметить, что полученная зависимость (2) имеет весьма ограниченное применение. Для каждого стенового материала и выбранного вида соли требуется специальным исследованием определять величины  $\beta$ ,  $\gamma$  и  $\xi$ .

В дальнейшем в результате вычислительного эксперимента авторами был получен большой объем дискретных значе-

ний  $\lambda$  засоленной кирпичной кладки, число которых составляло 3520, что соответствовало различным сочетаниям уровней исследуемых факторов для 44-х солей. Подробное описание эксперимента приведено в работе [3].

Для практического использования полученных результатов требовался иной подход, обобщающий данные расчетов коэффициента теплопроводности и обеспечивающий количественные оценки эффектов влияния на  $\lambda$  не отдельных солей, а их групп.

### Кластерный анализ результатов расчета коэффициента теплопроводности засоленного стенового материала

Эффекты влияния солей на коэффициент теплопроводности стенового материала, на наш взгляд, наиболее удобно учитывать с помощью поправочных коэффициентов, определяемых для групп солей. С помощью указанных поправочных коэффициентов при известных влаго- и солесодержании можно рассчитать теплопроводность стенового материала при наличии в нем отдельной соли или смеси солей.

В реальной ситуации для здания, в стенах которого произошло накопление солей, ряд физико-химических характеристик кристаллов и растворов солей стабилизируется и, по существу, при рассмотрении коэффициента теплопроводности солесодержащего стенового материала следует принимать во внимание воздействие на систему таких факторов, как вид соли, влаго- и солесодержание материала.

С учетом этих трех факторов был сделан анализ значений  $\lambda$  засоленной кирпичной кладки, в результате которого выяснилось, что при расположении значений  $\lambda$  системы «материал + соль» на координатной прямой некоторые из них находятся довольно близко друг к другу, образуя группы. Строгую границу между группами не всегда можно обозначить вследствие их близкого расположения друг к другу. Для корректного разбиения на группы массива значений нами выбран *метод кластерного анализа*, который принадлежит к строгим математическим методам и является одним из разделов многомерного анализа. Он позволяет с использованием методов математической статистики выделить отдельные группы (кластеры), каждая из которых значимо отличается от соседних групп. В этом случае внутри каждого кластера объекты, которыми являются численные значения  $\lambda$  засоленной кирпичной кладки, близки в рассматриваемом пространстве признака. Наиболее существенные методологические задачи кластерного анализа сводятся к двум: образование единой меры, охватывающей ряд признаков, и количественное решение о группировке объектов наблюдения [7].

При реализации кластерного анализа могут применяться методы аналитической и структурной группировки. Недостатком первого является возможность образования пустых кластеров. Поэтому нами использован метод структурной группировки [4], с помощью которого качественно однородная совокупность значений признака разбивается на кластеры, характеризующие строение и структуру исходной совокупности. Под структурой понимается распределение частот по интервалам группировки, причем интервалы и число групп могут выбираться различным образом. В процессе решения задачи производится искусственное разбиение скопления объектов или объединение далеко расположенных объектов и образование вариативных группировок. В вариативных группировках главная цель состоит в агрегировании данных и разложении общей вариации признака на вариации отдельных групп. С этой позиции в один кластер должны попасть наиболее близко расположенные объекты, в разные кластеры – наиболее удаленные.

Количество групп и величина интервалов между ними взаимосвязаны. Поэтому выбор длины интервала  $I$  производился с учетом обеспечения равномерного распределения единиц совокупности по группам и достижения при этом их представительности и качественной однородности.

Кластерный анализ выполнялся по разработанному алгоритму:

1 Строили интервальный вариационный ряд значений  $\lambda$ . Для этого величину интервалов определяли по формуле Стерджесса [7]:

$$I = (\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) / (1 + 3,322 \lg n),$$

где  $\lambda_{\max}$  и  $\lambda_{\min}$  – соответственно, наибольшее и наименьшее значение коэффициента теплопроводности;  $n$  – количество значений  $\lambda$ .

2 Рассчитывали среднее значение  $\lambda$  внутри групп, дисперсию рассеяния отдельных значений  $\lambda$  ( $S_j^2$ ) и объем каждого кластера ( $V_j$ ).

3 Проверяли статистическую значимость различия средних значений  $\lambda$  по  $t$ -критерию Стьюдента.

4 Оценивали однородность совокупности данных внутри групп по критерию Бартлетта ( $B$ ).

5 Проверяли первый ( $\tau_1$ ) и последний ( $\tau_k$ ) член каждого кластера, содержащего  $k$  значений по  $\tau$ -критерию.

6 Оценивали меры сходства внутри кластеров. Для этого определяли евклидово расстояние ( $d_{E(ij)}$ ), коэффициент вариации ( $V_S$ ) и коэффициент корреляции ( $\rho$ ).

На основе данного алгоритма разработана программная модель на языке C++. С помощью расчетов по модели произведено разбиение вариационных рядов на отдельные кластеры. Каждому выделенному кластеру ставили в соответствие среднее значение признака. Относя его к  $\lambda$  незасоленного материала при соответствующих условиях эксплуатации – А, Б и сухого материала, получили поправочные коэффициенты  $\epsilon$ , учитывающие наличие в материале солей. Фрагмент классификации при  $c = 1,5\%$  (масс.) приведен в таблице.

| c,<br>% (масс.)                                     | Влагосодержание ω, % (масс.) (условия эксплуатации)  |  |  |
|---|--|--|--|
|   | 0  | 1 (А)  | 2 (Б)  |
| Химическая формула соли / поправочный коэффициент ε |  |  |  |
| 1,5   | AgNO <sub>3</sub> , Ba(ClO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ,<br>Ba(ClO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> · 3H <sub>2</sub> O,<br>Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> , BaF <sub>2</sub> , BaS,<br>CaBr <sub>2</sub> , CaCl <sub>2</sub> , CdF <sub>2</sub> ,<br>CsBrO <sub>3</sub> , CsCl, CsClO <sub>3</sub> , KJ,<br>LiClO <sub>4</sub> , LiMnO <sub>4</sub> · 3H <sub>2</sub> O,<br>Mg(ClO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> , Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> ,<br>NaBrO <sub>3</sub> , NaI, Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ,<br>RbBrO <sub>3</sub> , RbNO <sub>3</sub> ,<br><u>Zn(ClO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> · 4H<sub>2</sub>O</u><br><b>1,026</b><br>CaJ <sub>2</sub> , KBr, KClO <sub>4</sub> , LiCl,<br>NH <sub>4</sub> Br, Rb <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , RbBr,<br><u>RbCl, RbJ</u><br><b>1,038</b><br><u>K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NaNO<sub>3</sub></u><br><b>1,052</b><br>Ba(NO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> , KCl, NaCl,<br><u>Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NaF, NH<sub>4</sub>Cl</u><br><b>1,068</b> | Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> , BaF <sub>2</sub> ,<br>BaS, CdF <sub>2</sub> ,<br>CsBrO <sub>3</sub> , CsClO <sub>3</sub> ,<br>KBr, KClO <sub>4</sub> , Li-<br>ClO <sub>4</sub> , Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> ,<br>NaBrO <sub>3</sub> , NaNO <sub>3</sub> ,<br>NH <sub>4</sub> Br,<br><u>Rb<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, RbBrO<sub>3</sub></u><br><b>1,021</b><br><u>Ba(NO<sub>2</sub>)<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub>Cl</u><br><b>1,037</b><br><br>K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , KCl,<br>NaCl,<br><u>Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NaF</u><br><b>1,051</b> | Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> , BaF <sub>2</sub> ,<br>BaS, CdF <sub>2</sub> ,<br>CsBrO <sub>3</sub> , CsClO <sub>3</sub> ,<br>KClO <sub>4</sub> , <u>NH<sub>4</sub>Cl</u> ,<br><u>RbBrO<sub>3</sub></u><br><b>1,023</b><br><br><u>K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, KCl, NaCl</u><br><b>1,036</b><br><br><u>NaF</u><br><b>1,055</b> |

### Интерпретация результатов кластерного анализа

Используя полученные поправочные коэффициенты, можно рассчитать коэффициент теплопроводности стенового материала при наличии в нем солей. Величина его определяется умножением нормативного коэффициента теплопроводности незасоленного стенового материала для условий эксплуатации А ( $\lambda_A$ ) или Б ( $\lambda_B$ ) на поправочный коэффициент ( $\varepsilon_A$  или  $\varepsilon_B$ ) для соответствующего условиям эксплуатации влагосодержания ( $\omega_A$  или  $\omega_B$ ) и прогнозируемого солесодержания:

$$\lambda = \varepsilon_{A(B)} \lambda_{A(B)}. \quad (3)$$

Если в стеновом материале содержится смесь солей (С + Д + Е + ...), то для условий эксплуатации А (Б) повышающий поправочный коэффициент  $\varepsilon_{A(B)}^{(C+D+E+...)}$  рассчитывается как произведение поправочных коэффициентов для отдельно взятых солей ( $\varepsilon_{A(B)}^{(C)}$ ,  $\varepsilon_{A(B)}^{(D)}$ ,  $\varepsilon_{A(B)}^{(E)}$ , ...):

$$\varepsilon_{A(B)}^{(C+D+E+...)} = \varepsilon_{A(B)}^{(C)} \varepsilon_{A(B)}^{(D)} \varepsilon_{A(B)}^{(E)} \dots \quad (4)$$

### Выводы

Для определения расчетных значений коэффициента теплопроводности кирпичной кладки, содержащей соли, предлагается к коэффициенту теплопроводности незасоленного материала использовать поправочные коэффициенты, полученные при разбиении солей на группы по степени их влияния на теплопроводность с учетом вида соли, влаго- и солесодержания в стеновом материале.

Подготовлено в рамках договора о научно-техническом сотрудничестве между ТГТУ (г. Тамбов) и БПИ (г. Белосток) по S/WB/02/06 (KBN).

### Список литературы

- 1 Дульнев, Г.Н. Процессы переноса в неоднородных средах / Г.Н. Дульнев, В.В.Новиков. – Л. : Энергоатомиздат : Ленингр. отд-ние, 1991. – 248 с.
- 2 Езерский, В.А. Физико-технические основы обеспечения эксплуатационной надежности ограждающих конструкций зданий при воздействии гигроскопических солей : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В.А. Езерский. – М. : МГСУ, 1994. – 38 с.
- 3 Езерский, В.А. Прогнозирование теплопроводности кирпичной кладки при воздействии солей / В.А. Езерский, Т.Ф. Ельчищева // Проблемы строительной теплофизики : сб. докл. 6-й науч. практ. конф. – М. : НИИСФ, 2001. – С. 286.
- 4 Елисеева, И.И. Группировка, корреляция, распознавание образов / И.И. Елисеева, В.О. Рукавишников. – М. : Статистика, 1977. – 243 с.
- 5 Ильинский, В.М. Строительная теплофизика / В.М. Ильинский. – М. : Высш. школа, 1974. – 320 с.
- 6 Миснар, А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций / А. Миснар. – М. : Мир, 1968. – 463 с.
- 7 Райская, Н.Н. Кластерный анализ и его применения / Н.Н. Райская, А.Т. Терехин, А.А. Френкель // Заводская лаборатория. – 1972. – № 10. – С. 1222 – 1228.

## **ОПИСАНИЕ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ДИФфуЗИИ В ДВУХКОЛБОВОМ АППАРАТЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЯЗЫКА ПРОГРАММИРОВАНИЯ DELPHI**

Большинство методов расчета многокомпонентного массопереноса в газовых смесях основано на использовании системы уравнений Стефана – Максвелла [1]. Эти уравнения достаточно сложны и громоздки из-за большого числа различных характеристик и их непосредственное применение для задач практики крайне неудобно. Поэтому нами был предложен простой, но в то же время достаточно точный метод расчета переноса в сложных газовых смесях, который основан на использовании метода эффективного коэффициента диффузии (ЭКД).

Суть метода состояла в том, что плотность диффузионного потока каждого компонента газовой смеси можно определить, используя первый закон Фика с некоторым эффективным коэффициентом диффузии в смесь остальных газов и только его градиентом концентрации. В предельном случае диффузии двух компонентов ЭКД тождественен коэффициенту взаимной диффузии (КВД).

Апробация метода проводилась на большом экспериментальном материале по изучению массопереноса в различных газовых смесях для самых общих случаев, когда соизмеримы концентрации всех компонентов, произвольно их распределение. Одновременно с экспериментальными исследованиями велась разработка на базе уравнений Стефана – Максвелла метода расчета сложного массопереноса, идеология которого была рассмотрена на конкретном примере в работе [2]. Программа расчета оказалась очень удачной и претерпела незначительную модернизацию лишь в 1995 г. [3]. Совпадение эксперимента и расчета, в основном, в пределах погрешности измерений свидетельствовало о том, что предложенная нами схема расчета диффузионных характеристик может с успехом применяться к описанию различных массообменных процессов (см., например, [4]).

Однако, дальнейшее развитие вычислительной техники поставило перед нами задачу, связанную с переводом программы расчета с языка Фортран (операционная система DOS) на один из современных языков программирования Delphi (операционная система Windows: 9X/Me, 2000, XP) при сохранении основной идеологии вычислительного процесса. Такой переход позволил увеличить производительность, создать удобный и «дружественный» интерфейс, а также, в отличие от операционной системы DOS, при вводе данных их редактирование и сохранение. В программе была учтена возможность построения графиков: вычисленных значений концентраций, разностей концентраций и коэффициентов диффузии компонентов в зависимости от времени, что весьма полезно для оперативной оценки полученных результатов. Она позволяла варьировать шагом по времени, а также минимальной разностью концентраций компонентов при расчетах [5]. Программа прошла успешную апробацию через сравнение с ранее полученными данными, а также она непосредственно использовалась для описания экспериментов с трехкомпонентными системами.

Таким образом, предложена программа на языке Borland Delphi для описания процесса массопереноса в изотермических многокомпонентных газовых смесях с использованием метода эффективных коэффициентов диффузии. В программе расширен объем информации о диффузионном переносе в двухколбовом аппарате. Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментами.

### Список литературы

- 1 Гиршфельдер, Дж. Молекулярная теория газов и жидкостей : пер. с англ. / Дж. Гиршфельдер, Ч. Кертисс, Р.Берд. – М. : ИЛ., 1961. – 932 с.
- 2 Жаврин, Ю.И. Расчет эквимолярной диффузии в многокомпонентных газовых смесях методом эффективных коэффициентов / Ю.И. Жаврин, Н.Д. Косов, З.И. Новосад // Диффузия в газах и жидкостях. – Алма-Ата, 1974. – С. 12–19.
- 3 Расчет диффузионного процесса в двухколбовом аппарате для случая многокомпонентной газовой смеси / Ю.И. Жаврин, Н.Д. Косов, В.Н. Косов, С.А. Красиков, А.Г. Бычков ; Каз. ун-т, НИИ ЭТФ. – Алматы, 1995. – 26 с. – Деп. в КазГосИНТИ 05.07.95, № 6239. Ка-95.
- 4 Исследование диффузии в системе (водород + метан) – воздух при различных давлениях и концентрациях компонентов бинарной смеси / А.З. Айткожаев, А.Г. Бычков, Ю.И. Жаврин, Н.Д. Косов, Ф.З. Курмакаев ; Каз. ун-т, НИИ ЭТФ. – Алма-Ата, 1993. – 22 с. – Деп. в КазНИИНКИ 15.01.93, № 3984. Ка-93.
- 5 Расчет многокомпонентного массопереноса в двухколбовом аппарате с применением языка программирования Delphi / Ю.И. Жаврин, В.Ю. Жаврин, В.Н. Косов, И.В. Поярко // Вестник КазНУ, серия физическая. – Алматы, 2006. – № 2 (22). – С. 72–79.

*М.В. Забавников, П.С. Беляев, О.Г. Маликов*

ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

## **К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМ КАЧЕСТВА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ ЧЕРЕЗ НОВЫЕ СЫРЬЕВЫЕ КОМПОНЕНТЫ ДОРОЖНЫХ СВЯЗУЮЩИХ И ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИХ ПРОИЗВОДСТВА**

Композиционные материалы на основе нефтяного битума занимают значительный сектор строительных материалов.

Одним из крупнотоннажных потребителей таких композиций является дорожно-строительная индустрия, концепция развития которой предусматривает пересмотр принципов эксплуатации имеющихся и параметров строящихся автомагистралей. Строительные организации обязаны будут обеспечивать удовлетворительное состояние дорожного полотна в течение расчетного срока его эксплуатации за счет собственных средств. Такая постановка вопроса вынуждает применять улучшенные материалы, которые способны обеспечивать длительный срок службы строящихся автомобильных дорог, а в случае выявления строительных дефектов обеспечивать дешевый и надежный способ ремонта.

Опыт строительства дорожных покрытий и анализ процесса разрушения слоев асфальтобетона показывает, что долговечность таких покрытий, при правильном расчете нагрузки и проектировании дорожного полотна, зависит в основном от свойств связующего – нефтяного дорожного битума.

Влияние на качество нефтяного битума осуществляется путем изменения его структуры при внедрении различных материалов в том числе и полимеров, таких как полиэтилен, полипропилен, поливинилхлорид, поливинилацетат, дивинилстирольные и стиролбутадиенстирольные сополимеры, каучуки, различные олигомеры, смолы, а также их отходы, в том числе и резиносодержащие. Необходимость выполнения исследований по разработке аппаратурно-технологического оформления процесса получения полимерных композиций на основе нефтяного битума вызвана тем, что в настоящее время в промышленности остро стоит вопрос повышения качества нефтяного битума путем модификации его различными полимерными добавками. Однако модификатора, удовлетворяющего всем технологическим, экономическим и экологическим требованиям, найти пока не удается.

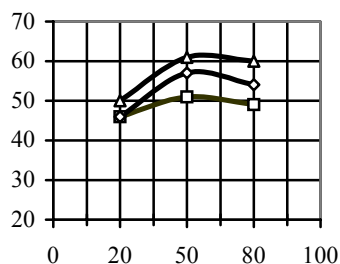
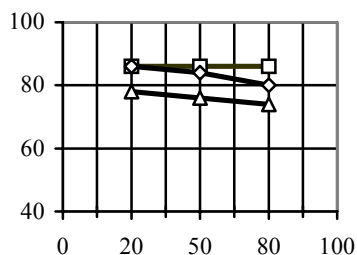
Перспективным материалом для модификации нефтяных битумов является резиновая крошка, полученная в результате утилизации изношенных автомобильных шин. В настоящее время нет проблем с этим сырьевым источником, так как разработано и используется значительное количество установок для производства резиновой крошки, реализующих различные принципы переработки изношенных шин, а на российский рынок интенсивно внедряется сравнительно недорогое оборудование, прежде всего, из Китая. В этом секторе производства остро встает другая проблема – куда использовать все возрастающие объемы резиновой крошки? Попытки использовать резиновую крошку, полученную при утилизации изношенных автомобильных шин, в качестве модификатора нефтяных битумов делаются давно, но получить в полной мере конкурентно-способный сырьевой компонент дорожных связующих из резиновой крошки пока не удается. Западные фирмы активно внедряются на российский рынок дорожной стройиндустрии, поставляя оборудование для производства дорожных покрытий и их ремонта, а также сырьевых компонентов для этих целей, в том числе с использованием продуктов переработки изношенных шин. Однако технологию приготовления этих новых сырьевых компонентов держат в строжайшем секрете.

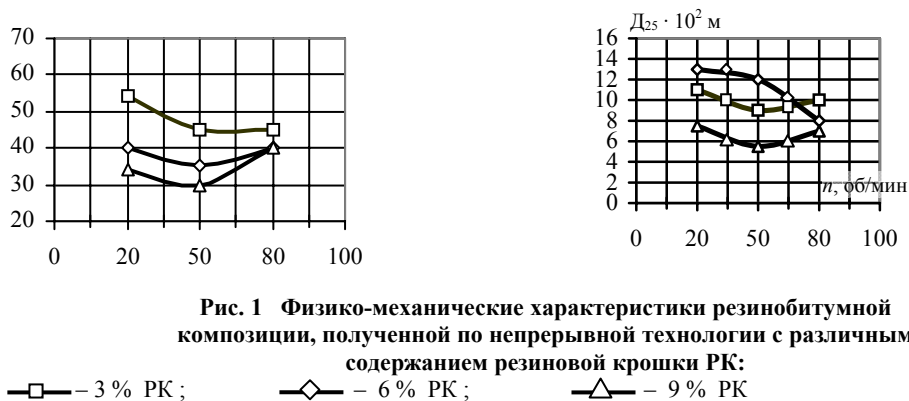
Почти все технологические процессы получения полимер-битумных композиций в России осуществляются по периодической схеме, а применяемые непрерывные схемы не в полной мере позволяют использовать все свойства полимерного материала в структуре композита. Использование именно непрерывной схемы производства композита позволяет устранить многие недостатки периодических смесителей, а именно: невозможность полной механизации и автоматизации процесса смешения, нестабильность физико-механических показателей получаемых смесей в разных партиях, высокая пожаро- и взрывоопасность, невозможность создания экологически чистых производств.

Нами сформулирована следующая цель исследований в направлении решения проблем качества автомобильных дорог: разработка двух видов сырьевых компонентов композиционных дорожных связующих на основе нефтяных битумов с использованием резиновой крошки из изношенных автомобильных шин:

- резинобитумного вяжущего, производимого непосредственно на асфальтных заводах и используемого в жидком виде при производстве асфальтобетонных смесей;
- резинобитумного концентрата – твердого компонента дорожных связующих, имеющего существенно более высокие сроки хранения без потерь качества и способного технологически совмещаться с нефтяными битумами по различным схемам, придавая им необходимый уровень эластичности в интервале температур эксплуатации автомобильных дорог в России.

Для достижения поставленной цели необходимо разработать новые прогрессивные технологии получения данных сырьевых компонентов по непрерывным схемам. В качестве оборудования для производства полимер-битумных композиций непрерывным методом предложено использование двухшнекового смесителя со сменными рабочими органами, который успешно применяется нами для производства высоковязких композиций [1, 2]. Проведенный анализ выявил необходимость модернизации смесителя для интенсификации процесса производства с целью снижения высокотемпературного воздействия на битумную основу, которое приводит к необратимым изменениям структуры битума. Для достижения поставленной цели была разработана концепция блочной компоновки роторов смесителя, снабженной специальными коническими валковыми насадками, которые позволяют повысить степень диспергирования полимерного материала в матрице нефтяного битума [3].





Исследования показали, что применение резиносодержащих отходов при улучшении структуры нефтяного битума приводит к возрастанию прочности асфальтобетонов, произведенных на его основе, в области высоких температур, приданию им свойства эластичности, способствует улучшению показателя морозостойкости. Такие результаты достигаются при содержании резиновой крошки в битуме до 10 % от его массы. В качестве примера на рис. 1 приведены зависимости физико-механических показателей резинобитумной композиции, полученной по разработанной технологии, от содержания резиновой крошки в композиции и частоты вращения роторов смесителя. Из рис. 1 видно, что наилучшими характеристиками обладает композиция, содержащая 6 % резиновой крошки фракции 1-0,8 мм, полученная при частоте вращения 50 об/мин. В этом случае удастся избежать снижения показателя  $\Pi_{25}$  (показателя пенетрации), характеризующего удобоукладываемость асфальтобетонной смеси, и достичь показателями  $T_{\text{киш}}$  (температуры размягчения по кольцу и шару),  $D_{25}$  (показатель растяжимости) и  $\mathcal{E}$  (показатель эластичности) необходимых значений, регламентируемых для резинобитумных композиций.

Повышение качества разработанных нами дорожных связующих подтверждается исследованиями свойств асфальтобетонных покрытий, полученных на их основе. Было установлено, что наиболее оптимальные эксплуатационные свойства проявляет асфальтобетон на основе связующего, содержащего 6 % резиновой крошки, с содержанием его в смеси асфальтобетона в количестве 7–8 % по массе. Асфальтобетон с применением этого вяжущего имеет следующие преимущества:

- показатель трещиностойкости выше на 25 %;
- увеличение прочности при 20 °С на 10–20 %;
- увеличение прочности при 50 °С на 15 %;
- увеличение показателя морозостойкости на 15 %.

Повышение качества нефтяного битума путем использования резиновой крошки позволяет не только повысить эксплуатационные характеристики асфальтобетонного покрытия, но и сократить содержание битумного связующего в асфальтобетонной смеси с 10–12 % (исходный битум) до 7–8 %.

Рекомендации по конструированию и расчету энергосиловых характеристик основного технологического оборудования при производстве резинобитумной композиции непрерывным способом приняты к использованию в ОАО «НИИРТмаш» (г. Тамбов); Государственным учреждением «Дирекция строящихся автомобильных дорог» (г. Тамбов) рекомендованы к использованию разработанные технология модификации нефтяного дорожного битума резиновой крошкой и технологическое оборудование, которое внедрено в производственный цикл ОАО «Агропромдорстрой» (г. Тамбов). Результаты работы внедрены в МУП «Мичуринский комбинат коммунальных услуг» (г. Мичуринск).

Как показал расчет экономической эффективности непрерывного процесса производства резинобитумной композиции, выполненный по программе Project Expert 6 Holding, рентабельность инвестиций к концу реализации проекта может составить 24,39 %, срок окупаемости менее 2 лет.

В настоящее время исследования продолжают в направлении дальнейшей переработки резинобитумной композиции в резинобитумный концентрат, учитывая опыт ряда западных фирм, например, «Crafco» (США), «Massenza» (Италия) и «Viafrance» (Франция), работающих в дорожном строительстве. Использование концентрата позволяет применять его для модификации битума в любых существующих технологических схемах производства асфальтобетона. К тому же концентрат является товарной продукцией, легко поставляемой и реализуемой в коммерческих интересах, так как срок его жизни по сравнению с модифицированным битумом велик.

При этом исследуется технология получения резинобитумного концентрата на основе резиновой крошки, прошедшей более полную регенерацию и одновременную активацию, что придает нефтяному битуму способность длительного хранения в обычных условиях и технологически совмещаться с дорожными битумами, придавая им требуемый уровень высокой эластичности в широком температурном интервале на стандартном технологическом оборудовании.

На конечной стадии получения резинобитумного концентрата предполагается использовать наноструктурные углеродные материалы, получаемые на опытно-промышленной установке в ООО «НТЦ машиностроения», г. Тамбов. Предварительные эксперименты показывают существенное улучшение прочности строительных материалов при использовании сравнительно небольшой концентрации этих материалов (0,001 ... 0,01 %).

Предложенная схема производственного процесса призвана обеспечивать необходимую производительность технологического комплекса, высокую степень безопасности и экологичности процесса, происходящего в закрытых герметизированных установках, обеспечивающих изоляцию продуктов термомеханической регенерации резиновых отходов от окружающей среды, а также создание технологической линии с высокой степенью автоматизации.



## Список литературы

- 1 Пат. 2029676 РФ, МКП В 29В 7/46. Червячный смеситель для полимерных материалов / Клинков А.С., Маликов О.Г., Хабаров С.Н., Хрущев С.П. – № 5023189/05 ; заявл. 16.07.1991 ; опубл. 27.02.1995, Бюл. № 6.
- 2 Пат. 2134198 РФ, МКП В 29В 7/46. Червячный смеситель для композиционных полимерных материалов / Клинков А.С., Маликов О.Г., Хабаров С.Н., Ефремов О.В. – № 97120285 ; заявл. 09.12.1997 ; опубл. 10.08.1999, Бюл. № 6.
- 3 Пат. 2247654 РФ, МПК В 29В 7/34, 7/46// В 29 К 95:00. Смеситель непрерывного действия для композиционных строительных материалов на основе нефтяных битумов / Забавников М.В., Беляев П.С., Маликов О.Г., Хабаров С.Н. – № 2003125507/12 ; заявл. 18.08.2003 ; опубл. 10.02.2005, Бюл. № 7.

**И.Н. Ищук**

Тамбовское высшее военное авиационное инженерное  
училище радиоэлектроники (военный институт)

### **ПРИНЦИПЫ ТЕПЛОВОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ И ТОМОГРАФИИ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТНЫХ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ**

Проблемы теплового неразрушающего контроля, и в частности дефектоскопии и томографии, привлекают все возрастающее внимание специалистов, разрабатывающих и применяющих различные средства и системы термографического анализа в науке и технике. Это быстро развивающееся направление пока еще сдерживается недостаточным уровнем математического моделирования тепловых процессов и методов обнаружения дефектов в процессе автоматизированного теплового неразрушающего контроля, пригодных для использования на практике.

Одной из задач нового научного направления вычислительной теплофизики является задача оптимального управления, основанная на специальных экспериментах и более точных теоретических результатах с привлечением положений теории подобия [1, 2].

Методика решения задачи оптимального управления тепловыми процессами основывается на принципе управления по отклонению (невязки) – принцип обратной связи. Решение задачи условно разделено на две части: получение неявной математической модели сосредоточенными параметрами путем перехода от реальной физической модели с распределенными параметрами на основе численного решения методом сеток или конечных элементов и решение обратной нелинейной коэффициентной задачи теплопроводности вариационно-итерационным методом путем минимизации функционала невязки, при этом тепловое моделирование выполняется на основании результатов экспериментальных исследований.

Для получения неявной математической модели имеет принципиальное значение аппроксимирующая функция зависимости теплофизических свойств от температуры. Для приближенного решения нелинейной задачи теплопроводности можно использовать кусочно-линейную функцию:

$$\gamma(T) = \begin{cases} \gamma(1 + TK_{1\gamma}), & T < T_1; \\ \gamma(1 + T_1(K_{1\gamma} - K_{2\gamma}) + K_{2\gamma}T), & T_1 < T \leq T_2; \\ \gamma(1 + T_1(K_{1\gamma} - K_{2\gamma}) + T_2(K_{2\gamma} - K_{3\gamma}) + K_{3\gamma}T), & T > T_2, \end{cases}$$

где  $\gamma = a, \lambda$  – тепло- и температуропроводность при значении избыточной температуры  $0^\circ\text{C}$ ;  $T_1, T_2$  – уровни дискретизации финитной функции;  $K_{ja}, K_{j\lambda}$  – линейный коэффициент зависимости теплофизических свойств от температуры ( $j = \overline{1, 3}$ ).

При численном решении прямой задачи теплопроводности необходимо учитывать как теплоперенос по датчикам температур – термопарам и нагревательным элементам, наличие контактного термического сопротивления, так и зависимость  $K_{ja}, K_{j\lambda}$  от класса материала: теплопроводник, повышенной теплопроводности, средней теплопроводности, малой теплопроводности и сверх малой теплопроводности [3].

Представим решение прямой задачи теплопроводности в операторной форме как  $\omega = Ru$ . Прямая задача состоит в вычислении  $\omega$  по известному  $u$ , где  $R$  – оператор линейного отображения функции  $u$  в функцию  $\omega$ . Пусть функция  $\omega$  известна с некоторой ошибкой  $\delta$ , т.е. об «истинной» функции  $\tilde{\omega}$  известно лишь, что  $|\omega - \tilde{\omega}| \leq \delta$ . Необходимо определить функцию  $u$  так, что  $\|Ru - \omega\| \rightarrow \min$ .

На основе теории регуляризации некорректных задач рассмотрим конструкцию решения обратной (коэффициентной) задачи теплопроводности [4]:

$$\min_{u(\cdot)} \left\{ \|Ru - \omega\|^2 + \xi \left\| \frac{du}{dx} \right\|^2 \right\},$$

с применением дополнительной оценки уклонения  $\omega$  от  $\tilde{\omega}$  как  $\rho(\omega, \tilde{\omega}) \leq \delta$ , где  $\xi$  – параметр регуляризации.

Запишем метод решения данной задачи в формальном виде

$$u = R_\xi^{-1}\omega,$$

где  $R_\xi^{-1}$  – регуляризованный обратный оператор  $R^{-1}$ , при этом  $R^{-1}$  неограничен, а  $R_\xi^{-1}$ , что очень важно, с хорошей точностью аппроксимирует  $R^{-1}$ . Точность аппроксимации зависит от метода регуляризации и параметра  $\xi$ , кроме ограниченности  $R_\xi^{-1}$ ,

важной характеристикой является норма  $\|R_{\xi}^{-1}\|$ . От ее величины зависит соотношение между точностью задания  $\omega$  и точностью ответа  $u$ .

В работе [5] представлена дискретная модель, которая позволяет моделировать тепловой процесс в заданном объеме пространства, при этом среднеквадратическое отклонение моделирования методом конечных разностей и натурального эксперимента для выбранных эталонных материалов в диапазоне  $[0,03; 0,2]$  Вт/м · К  $[2,8; 4,2] \times 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с на интервале времени  $1, 6$  менее 1,8 %.

Для идентификации теплофизических свойств (ТФС) испытуемых материалов используется невязка вида:

$$J_{\xi}(a, \lambda) = \int_0^{\tau_e} [T(\tau) - \tilde{T}(\tau, a, \lambda)]^2 d\tau + \xi_1(\tau_{\max} - \tilde{\tau}_{\max})^2 + \xi_2(T_{\max} - \tilde{T}_{\max})^2,$$

где  $T$  – значения избыточной температуры реального испытания;  $\tilde{T}$  – значения избыточной температуры, рассчитанные по дискретной математической модели;  $\tau$  – текущее время;  $\tau_e$  – время окончания измерений;  $T_{\max}$  – максимальное значение избыточной температуры;  $\tilde{T}_{\max}$  – максимальное значение избыточной температуры, рассчитанной по дискретной математической модели.

Характерной точкой измеряемой избыточной температуры является максимум температуры, поэтому для уменьшения уклонения экспериментальной температурной кривой от рассчитанной по дискретной математической модели вторым и третьим слагаемыми невязки являются время и значение уклонения максимума температуры. Если параметры регуляризации  $\xi_2$  задать как обратную зависимость от  $T_{\max}$ , то он дополнительно будет играть роль фильтра высокочастотной составляющей измеряемой избыточной температуры при идентификации ТФС.

Задача тепловой томографии подобна идентификацией ТФС с той лишь разницей, что дискретная модель должна учитывать наличие дефекта, а итерационно-вариационная задача решается для дифференциальных термограмм между температурным полем, полученным для тела без дефекта и тела с дефектом.

Минимизация функционала, определяемого разностью измеренного и вычисленного сигналов для идентификации предполагаемых параметров дефекта, производится методом сопряженных градиентов среднеквадратической невязки:

$$\left\{ J_{\xi}(a, \lambda, \mu) = \int_0^{\tau_e} [D(\tau) - \tilde{D}(\tau, a, \lambda, \mu)]^2 d\tau + \xi(\tau_{\max} - \tilde{\tau}_{\max})^2 \right\} = \min,$$

где  $D(\tau)$  – значения дифференциальной термограммы реального испытания;  $\tilde{D}(\tau, a, \lambda, \mu)$  – значения дифференциальной термограммы, рассчитанные с использованием дискретной математической модели для дефекта с ТФС  $\{a, \lambda\}$ ,  $\mu$  – координата дефекта.

Таким образом, задача тепловой дефектоскопии и томографии на основе численного решения коэффициентных задач теплопроводности сводится к итерационно-вариационной постановке задачи оптимального управления, в которой входными параметрами являются теплофизические свойства дефекта минимальных размеров и координата глубины его залегания в испытуемом материале.

Работа выполнена в соответствии с грантом Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых по заявке МК-758.2007.10.

#### Список литературы

- 1 Коздоба, Л.А. Вычислительная теплофизика / Л.А. Коздоба. – Киев : Наукова думка, 1992.
- 2 Алифанов, О.М. Идентификация процессов теплообмена летательных аппаратов / О.М. Алифанов. – М. : Машиностроение, 1979.
- 3 Гурьев, В.В. Тепловая изоляция в промышленности. Теория и расчет / В.В. Гурьев, В.С. Жолудов, В.Г. Петров-Денисов. – М. : Стройиздат, 2003. – 416 с.
- 4 Федоренко, Р.П. Приближенное решение задач оптимального управления / Р.П. Федоренко. – М. : Наука, 1978.
- 5 Ищук, И.Н. Тепловой неразрушающий контроль теплофизических свойств материалов на основе многофакторных функций преобразования / И.Н. Ищук, А.И. Фесенко // Измерительная техника. – 2005. – № 7. – С. 44; Ishchuk I. N., Fesenko A. I. Thermal Nondestructive Testing of the Thermal Properties of Materials Using Multifactor Transformation Functions // Measurement Techniques. – 2005. – V. 48. – No. 7. – P. 693.

*Л.И. Курлапов*

*Казахский национальный университет им. аль-Фараби (г. Алматы)*

#### **РАВНОВЕСНЫЕ И НЕРАВНОВЕСНЫЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОЛЕКУЛЯРНО-КЛАСТЕРНЫХ СМЕСЕЙ ГАЗОВ**

Структурными элементами, тепловое движение и взаимодействия которых определяют свойства газов, являются не только молекулы, но и кластеры в виде димеров, тримеров и образований из большего числа молекул. Доля кластеров стано-

вится заметной при высоких давлениях и/или низких температурах. В кластерной модели каждый газ рассматривается как многокомпонентная смесь, и его свойства определяются методами, которые разработаны для описания смесей, состоящих из различных молекул, в частности, методами кинетической теории газов [1, 2]. При таком описании необходимо использовать данные о кластерном составе. В схеме расчета концентраций кластерных субкомпонентов, основанной на экспоненциальном распределении кластеров по их размерам, кластерный состав определяется концентрацией молекул (мономеров) и параметром, входящим в показатель степени экспоненты. Таким образом, особенности индивидуальных свойств газа при определенных условиях можно выразить путем задания концентрации молекул, параметра экспоненциального распределения и эффективных диаметров столкновений частиц. В разработанной схеме эти величины определяются путем обобщений имеющихся экспериментальных данных в достаточно узкой области давлений и температуры, а вычисленные по ним концентрации кластеров дают возможность рассчитывать как равновесные, так и неравновесные свойства при всех макропараметрах, при которых вещество существует в газообразном состоянии. Преимущества такого способа описания заключаются в том, что такие данные, через кластерный состав, позволяют описывать и равновесные свойства, и процессы переноса в газах в широкой области макропараметров.

Влияние кластеров на равновесные свойства газов сказывается через переменность числа молей: при образовании кластеров число молей структурных элементов уменьшается. В уравнении состояния это учитывается через фактор сжимаемости [1–3], через который также учитывается и собственный объем частиц. Совместное влияние этих двух механизмов приводит к изменению фактора сжимаемости при изменении макропараметров: он может быть как больше единицы (когда превалирует влияние собственного объема), так и меньше единицы (когда превалирует механизм уменьшения числа молей структурных элементов из-за образования кластеров). Расчеты фактора сжимаемости с учетом концентраций кластеров, определенных по разработанной схеме [1, 2] для различных газов и паров, хорошо согласуются с известными данными.

Для описания процессов переноса учитывается вклад каждого кластерного субкомпонента в наблюдаемый поток экстенсивного свойства. Коэффициенты диффузии, термодиффузии, вязкости, теплопроводности рассчитываются по формулам кинетической теории многокомпонентных смесей. Отличия молекулярно-кластерной смеси от чисто молекулярного газа связаны с особенностями кластерных субкомпонентов. Одна особенность имеет простое объяснение в молекулярно-кинетической теории. Это эффект персистенции скоростей после столкновений: тяжелая частица претерпевает малоугловое отклонение при столкновении с легкой. В молекулярно-кластерной смеси этот эффект становится существенным, как и другие эффекты, которые в простых газах малозаметны.

В неоднородных газах при переходе группы кластеров из домена с одними локально-равновесными макропараметрами в соседний одни кластеры распадаются, порождая более мелкие или, напротив, образуются, поглощая более мелкие. Такие особенности приводят к аномалиям неравновесных свойств. В частности, температурная зависимость вязкости газа в околокритической области, концентрационная зависимость коэффициента взаимной диффузии, направление термодиффузионного бароэффекта соответствуют жидкому состоянию. Это связано с мезоскопическими свойствами больших кластеров в молекулярно-кластерных смесях. Учет тепловых эффектов распада или образования кластеров позволяет оценить такие особенности, как мезоскопический фазовый переход, учет которого позволяет прогнозировать особенности тепловых процессов.

#### Список литературы

- 1 Курлапов Л.И. // ЖТФ. – 2003. – Т. 73, Вып. 2. – С. 51–55.
- 2 Курлапов Л.И. // ИФЖ. – 2003. – Т. 76, № 4. – С. 23–29.
- 3 Гиршфельдер, Дж. Молекулярная теория газов и жидкостей / Дж. Гиршфельдер, Ч. Кертисс, Р. Берд. – М.: ИЛ, 1961. – 930 с.

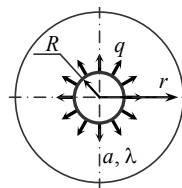
*Н. Ф. Майникова*

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАКОНА ДВИЖЕНИЯ ГРАНИЦЫ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА

ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

Постановка и решение тепловых задач, использующих аппарат аналитической теории теплопроводности для областей с границами, перемещающимися по известному закону, существенно упрощаются. В связи с этим разработана алгоритма, реализующего теплофизический метод определения закона движения границы фазового перехода (ФП) в полимерном материале (ПМ), актуальна.

Рассмотрим задачу о распространении тепла в сферическом пространстве (рис. 1). Начальная температура тела из ПМ во всех точках равна нулю. В момент времени  $\tau = 0$  на сферической поверхности с координатами  $r = R$  начинает действовать источник тепла с плотностью теплового потока  $q$ . При температуре  $T = T_n$  ПМ имеет фазовый переход, теплота которого –  $Q_n$ . Теплофизические свойства (ТФС) тела в результате ФП меняются незначительно. Необходимо найти распределение температуры внутри тела в любой момент времени. До тех пор, пока температура в любой точке тела меньше  $T_n$ , задача будет описываться классическим уравнением теплопроводности в сферических координатах с граничными условиями второго рода на поверхности с координатами  $r = R$ . Решение задачи известно [1]:



**Рис. 1** Тепловая схема системы с поверхностным сферическим нагревателем

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

где  $a, \lambda$  – температуропроводность и теплопроводность тела.

На момент времени  $\tau_{\text{нп}}$ , соответствующий началу ФП, решение имеет следующий вид:

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

Выражения (1), (2) в безразмерном представлении имеют вид:

$$\Theta(\zeta, \text{Fo}) = \frac{1}{\zeta} \left\{ \operatorname{erfc} \left( \frac{\zeta-1}{2\sqrt{\text{Fo}}} \right) - \exp(\zeta-1 + \text{Fo}) \operatorname{erfc} \left( \frac{\zeta-1}{2\sqrt{\text{Fo}}} + \sqrt{\text{Fo}} \right) \right\}; \quad (3)$$

$$\Theta_{\text{н}} = 1 - \exp(\text{Fo}_{\text{нп}}) \operatorname{erfc}(\sqrt{\text{Fo}_{\text{нп}}}), \quad (4)$$

где  $\Theta = \frac{T}{T_{\text{max}}}$ ;  $\Theta_{\text{н}} = \frac{T_{\text{н}}}{T_{\text{max}}}$ ;  $\zeta = \frac{r}{R}$ ;  $\text{Fo} = \frac{a\tau}{R^2}$ ;  $T_{\text{max}} = \frac{qR}{\lambda}$ .

В момент образования новой фазы начальное распределение температуры определяется зависимостью

$$\Theta_0(\zeta) = \frac{1}{\zeta} \left\{ \operatorname{erfc} \left( \frac{\zeta-1}{2\sqrt{\text{Fo}_{\text{нп}}}} \right) - \exp(\zeta-1 + \text{Fo}_{\text{нп}}) \operatorname{erfc} \left( \frac{\zeta-1}{2\sqrt{\text{Fo}_{\text{нп}}}} + \sqrt{\text{Fo}_{\text{нп}}} \right) \right\}, \quad (5)$$

а распределение температуры в теле находится из задачи стефановского типа:

$$\frac{\partial}{\partial \text{Fo}} \Theta_{1\text{ф}}(\zeta, \text{Fo}) = \frac{\frac{\partial}{\partial \zeta} \left( \zeta^2 \frac{\partial}{\partial \zeta} \Theta_{1\text{ф}}(\zeta, \text{Fo}) \right)}{\zeta^2}, \quad \text{Fo} > 0, \quad 1 < \zeta < \zeta_{\text{н}}; \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial \text{Fo}} \Theta_{2\text{ф}}(\zeta, \text{Fo}) = \frac{\frac{\partial}{\partial \zeta} \left( \zeta^2 \frac{\partial}{\partial \zeta} \Theta_{2\text{ф}}(\zeta, \text{Fo}) \right)}{\zeta^2}, \quad \text{Fo} > 0, \quad \zeta_{\text{н}} < \zeta < \infty; \quad (7)$$

$$\Theta_{2\text{ф}}(\zeta, 0) = \Theta_0(\zeta), \quad \zeta > 1; \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial \zeta} \Theta_{1\text{ф}}(1, \text{Fo}) = -1, \quad \text{Fo} > 0; \quad (9)$$

$$\Theta_{2\text{ф}}(\infty, \text{Fo}) = 0, \quad \text{Fo} > 0; \quad (10)$$

$$\Theta_{1\text{ф}}(\zeta_{\text{н}}(\text{Fo}), \text{Fo}) = \Theta_{2\text{ф}}(\zeta_{\text{н}}(\text{Fo}), \text{Fo}) = \Theta_{\text{н}}, \quad \text{Fo} > 0; \quad (11)$$

$$\left( \frac{\partial}{\partial \zeta} \Theta_{1\text{ф}}(\zeta_{\text{н}}(\text{Fo}), \text{Fo}) \right) - \left( \frac{\partial}{\partial \zeta} \Theta_{2\text{ф}}(\zeta_{\text{н}}(\text{Fo}), \text{Fo}) \right) = \Omega_{\text{н}} \left( \frac{\partial}{\partial \text{Fo}} \zeta_{\text{н}}(\text{Fo}) \right), \quad \text{Fo} > 0. \quad (12)$$

Здесь  $\zeta_{\text{н}} = f(\text{Fo})$  – свободная граница, которая не задана и подлежит определению вместе с безразмерными температурами  $\Theta_{1\text{ф}}(\zeta, \text{Fo})$  и  $\Theta_{2\text{ф}}(\zeta, \text{Fo})$  в новой (индекс «1ф») и старой (индекс «2ф») фазах;  $\Omega_{\text{н}} = Q_{\text{н}} a / (qR)$  – теплота фазового перехода в безразмерном виде.

При условии, что поверхность с координатой  $r = R$  достигает  $T_{\text{н}}$  при больших значениях  $\text{Fo}$ , начальное условие (8) в безразмерной форме имеет вид:

$$\Theta_{2\text{ф}}(\zeta, 0) = \frac{1}{\zeta} \left\{ 1 - (1 - \Theta_{\text{н}}) \left( \frac{1}{0,5(\zeta-1)(1-\Theta_{\text{н}})^2 + 1} - \zeta + 1 \right) \right\}. \quad (13)$$

Для определения закона движения границы ФП применены два варианта преобразований.

Вариант 1. Считаем, что закон движения границы ФП такой же, как закон движения изотермы с температурой  $T_{\text{н}}$  в случае отсутствия перехода. В результате получено выражение:

$$\Theta_{\text{н}} = \frac{1}{\zeta_{\text{н}}} \left\{ 1 - \frac{\zeta_{\text{н}} - 1}{\sqrt{\pi} \sqrt{\text{Fo}^*}} - \frac{\sqrt{\text{Fo}^*}}{\sqrt{\pi} (0,5(\zeta_{\text{н}} - 1) + \text{Fo}^*)} \right\}, \quad \text{где } \text{Fo}^* = \text{Fo} + \frac{1}{\pi(1 - \Theta_{\text{н}})^2}. \quad (14)$$

Решение уравнения (14) имеет вид:

$$\zeta_{\pi}(Fo) = \frac{1}{2} \left( -2\Theta_{\pi}\pi Fo^{*2} + \pi Fo^{*} - 2\sqrt{\pi} Fo^{*3/2} + 2\sqrt{\pi} Fo^{*1/2} + \Theta_{\pi}\pi Fo^{*} + \right. \\ \left. + \left[ \pi^2 Fo^{*2} - 2\Theta_{\pi}\pi^2 Fo^{*2} + 4\Theta_{\pi}\pi^2 Fo^{*3} + \Theta_{\pi}^2\pi^2 Fo^{*2} - 2\Theta_{\pi}\pi^{3/2} Fo^{*5/2} + \right. \right. \\ \left. \left. + 8\Theta_{\pi}\pi^{3/2} Fo^{*7/2} + 4\pi Fo^{*3} - 8\pi Fo^{*2} + 4\Theta_{\pi}^2\pi^2 Fo^{*4} - 4\Theta_{\pi}^2\pi^2 Fo^{*3} + \right. \right. \\ \left. \left. + 4\pi^{3/2} Fo^{*5/2} \right]^{1/2} \right) / \left( 4\Theta_{\pi}^2\pi^2 Fo^{*} + \sqrt{\pi} Fo^{*1/2} \right). \quad (15)$$

Выражение (15) достаточно сложно для применения его на практике. Введем дополнительные упрощения. Предполагаем, что  $\zeta_{\pi} - 1 < Fo$ .

Случай 1. Пренебрегаем в выражении (14) величинами  $\frac{\zeta_{\pi} - 1}{\sqrt{\pi}\sqrt{Fo^{*}}}$  и  $0,5(\zeta_{\pi} - 1)$ . Решение имеет вид:

$$\zeta_{\pi}(Fo) = \frac{\sqrt{Fo\pi(1-\Theta_{\pi})^2 + 1} - 1 + \Theta_{\pi}}{\Theta_{\pi}\sqrt{Fo\pi(1-\Theta_{\pi})^2 + 1}}. \quad (16)$$

Случай 2. Пренебрегаем в выражении (14) величиной  $0,5(\zeta_{\pi} - 1)$ :

$$\zeta_{\pi}(Fo) = \frac{\sqrt{Fo\pi(1-\Theta_{\pi})^2 + 1}}{\Theta_{\pi}\sqrt{Fo\pi(1-\Theta_{\pi})^2 + 1} - \Theta_{\pi} + 1}. \quad (17)$$

Вариант 2. Закон движения границы ФП должен удовлетворять следующим условиям.

Условие 1. В момент времени  $Fo = 0$  координата границы перехода должна соответствовать  $\zeta_{\pi} = 1$ .

Условие 2. При отсутствии ФП в теле возникает квазистационарное температурное поле, определяемое выражением  $\Theta_{ст}(\zeta) = 1/\zeta$ . Очевидно, что подобное квазистационарное распределение температуры соответствует и случаю с ФП. При  $Fo \rightarrow \infty$  координата перехода должна принимать значение  $\zeta_{\pi} = 1/\Theta_{\pi}$ . Условие 2 применимо для ФП, сопровождающегося поглощением тепла.

Условие 3. Значение координаты границы перехода будет отставать (если переход идет с поглощением тепла) или опережать (если ФП идет с выделением тепла) значение координаты изотермы с соответствующей температурой в случае отсутствия ФП.

Для определения закона движения границы ФП в качестве искомым были подобраны функции, удовлетворяющие условиям 1 и 2.

По варианту 1 на основании выражений (16) и (17):

$$\zeta_{\pi}(Fo) = \frac{(Fo\pi(1-\Theta_{\pi})^2 + m^{1/k})^k - (1-\Theta_{\pi})m}{\Theta_{\pi}(Fo\pi(1-\Theta_{\pi})^2 + m^{1/k})^k}, \quad k > 0, m > 0, \quad (18)$$

$$\zeta_{\pi}(Fo) = \frac{(Fo\pi(1-\Theta_{\pi})^2 + m^{1/k})^k}{\Theta_{\pi}(Fo\pi(1-\Theta_{\pi})^2 + m^{1/k})^k + (1-\Theta_{\pi})m}, \quad k > 0, m > 0. \quad (19)$$

По варианту 2:

$$\zeta_{\pi}(Fo) = \frac{Fo^k + m}{\Theta_{\pi} Fo^k + m}, \quad k > 0, m > 0. \quad (20)$$

Подбор варьируемых параметров  $k$  и  $m$  найденных функций осуществляется таким образом, чтобы удовлетворялось условие 3 при наилучшем приближении к данным, полученным в результате численного решения задачи (6) – (12).

Выполнено имитационное исследование влияния тепловых режимов воздействия, теплоты ФП, ТФС полимерных объектов на закон движения границы ФП применительно к неразрушающему методу теплофизического контроля [2]. Полученные данные свидетельствуют о хорошем совпадении теоретических зависимостей (18) – (20) с результатами численного решения. Примеры экспериментальной реализации метода позволили признать удовлетворительным применяемый математический подход к решению задачи.

#### Список литературы

- 1 Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М. : Высш. шк., 1967. – 599 с.
- 2 Жуков, Н.П. Многомодельные методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов и изделий : монография / Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова. – М. : Машиностроение-1, 2004. – 288 с.

**ДВУХФАЗНАЯ ЗОНА И СКАЧОК КОЭФФИЦИЕНТА ПОГЛОЩЕНИЯ ПРИ ИНТЕНСИВНОМ НАГРЕВЕ  
ОКСИДА АЛЮМИНИЯ**

Математическая формулировка проблемы радиационно-кондуктивного переноса энергии (РКПЭ) применительно к нагреву плоского слоя полупрозрачных тугоплавких оксидов концентрированным лазерным излучением описана в [1]. Помимо одномерной нестационарной задачи РКПЭ с учетом плавления, в модели учитываются произвольные нелинейные граничные условия теплообмена на передней и задней поверхностях образца, зависимость теплофизических свойств обеих фаз от температуры, а терморadiационных и оптических свойств – от температуры и длины волны. Математическая модель включает возможное наличие протяженной двухфазной зоны, в которой фазовый переход осуществлялся лишь частично. В этой области маленькие частицы твердой и жидкой фаз перемешаны, а их температура равна температуре плавления (затвердевания). Предполагается, что время релаксации двухфазной зоны к тепловому равновесию между твердой и жидкой фракциями является очень коротким.

В настоящей статье отражены некоторые результаты расчетов РКПЭ, относящиеся к образованию двухфазной зоны в процессе нагрева при плавлении  $Al_2O_3$ . Двухфазная зона может быть охарактеризована объемной частью жидкой фазы  $\xi$ , которая является функцией координаты. Предполагается, что размеры частиц меньше микрометра и соответственно много меньше размеров двухфазной зоны. В этом случае уравнение сохранения энергии для двухфазной зоны имеет вид:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = \frac{Q_l + Q_{rad}}{Q_f \rho},$$

где  $\rho$  – плотность двухфазной области, которая рассчитывается как  $\rho = \rho_{sol}(1 - \xi) + \rho_{liq}\xi$ ;  $\rho_{sol}$  и  $\rho_{liq}$  – плотности соответственно твердой и жидкой фаз в точке плавления;  $Q_l$  и  $Q_{rad}$  – функции внутренних источников тепла для лазерного излучения и радиационного переноса энергии, а  $Q_f$  – скрытая теплота плавления.

Размеры частиц и объемное содержание жидкости в двухфазной зоне при плавлении определяют ее оптические свойства – коэффициент поглощения  $k$  и коэффициент рассеяния  $\beta$ . Рассеяние должно иметь место из-за различий показателя преломления твердой и жидкой фаз. Однако в разработанной модели мы были вынуждены отказаться от учета рассеяния, так как это значительно усложнило бы математическую формулировку задачи и алгоритм ее решения. Кроме того, размер частиц в двухфазной зоне очень трудно определить.

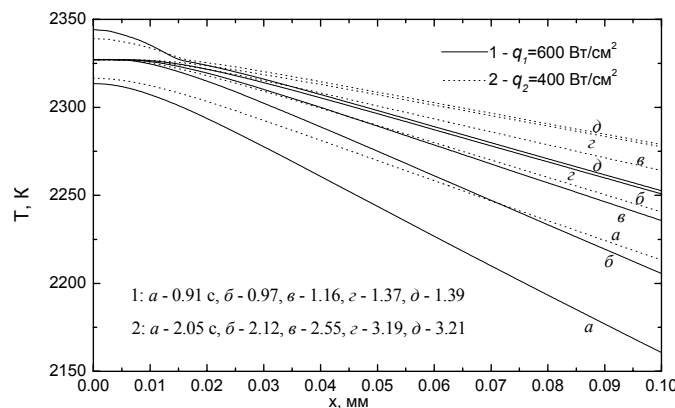
Оптические свойства для двухфазной зоны рассчитывались по соотношениям:

$$n = n_{sol}(1 - \xi) + n_{liq}\xi; \tag{1}$$

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_{sol}}(1 - \xi) + \frac{1}{k_{liq}}\xi,$$

где  $n_{sol}$  и  $n_{liq}$  – показатели преломления твердой и жидкой фаз в точке плавления;  $k_{sol}$  и  $k_{liq}$  – соответственно коэффициенты поглощения твердой и жидкой фаз. Плотность  $\rho$  вычислялась по выражению, аналогичному (1). Теплопроводность  $\Lambda$  и теплоемкость  $C_p$  в двухфазной зоне знать не нужно, поскольку температура постоянна и равна температуре плавления. У оксида алюминия  $k_{liq}$  больше, чем  $k_{sol}$  вблизи температуры плавления, почти на два порядка величины. Это оказывает существенное влияние на формирование поля температуры при нагреве.

На рис. 1 показаны поля температур в приповерхностном слое толщиной 0,1 мм в начальной стадии плавления, а также незадолго до и после нее, при нагреве образца монокристалла оксида алюминия толщиной 5 мм двумя плотностями потока греющего излучения  $CO_2$ -лазера  $q_1 = 600$  Вт/см<sup>2</sup> и  $q_2 = 400$  Вт/см<sup>2</sup>.



**Рис. 1 Плавление двухфазной зоны и последующий нагрев**

Видно, что толщина изотермической двухфазной зоны составляет менее 10 мкм. Такая же толщина этой зоны имеет место при нагреве другими плотностями потока, но для ее полного расплавления при разных плотностях потока требуется разное время. Начальная стадия плавления связана с глубиной проникновения греющего излучения  $CO_2$ -лазера. В расчетах бы-

ло принято, что коэффициент поглощения на длине волны 10,6 мкм равен  $1000 \text{ см}^{-1}$ . Поскольку двухфазная зона оптически достаточно тонкая, несмотря на большую величину  $k_{liq}$ , то выходящее из слоя излучение в области полупрозрачности определяется не только этой изотермической двухфазной зоной, но и в значительной степени лежащими глубже более холодными слоями кристалла. Поэтому эффективные (яркостные) температуры, определяемые на основе расчета интенсивности излучения, выходящего из образца, в интервале времени, когда идет процесс плавления в этой зоне, много ниже температуры плавления (рис. 2). Так, например, для длины волны 0,55 мкм значения  $T_{эф1}$  в моменты времени 0,97, 1,16 и 1,37 с (кривые б, в и г для  $q_1$  на рис. 1) составляют соответственно 1898, 1918 и 1931 К, а в моменты 2,12, 2,55 и 3,19 с (кривые б, в и г для  $q_2$ ) соответственно 1893, 1921 и 1940 К.

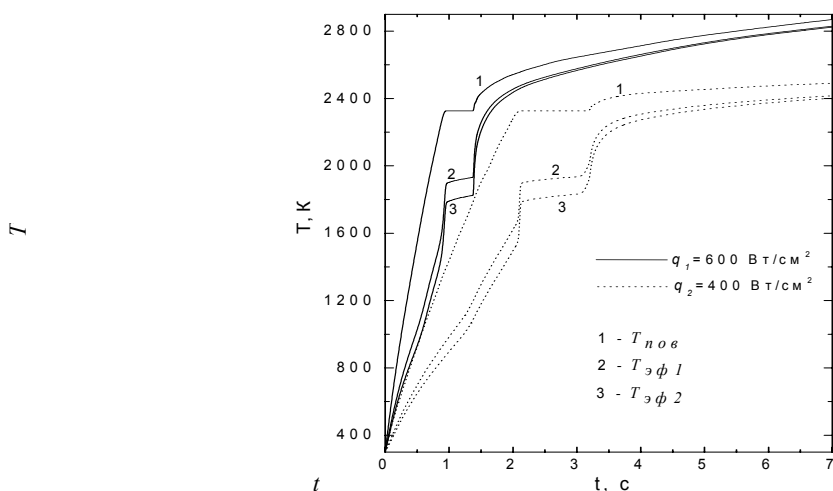


Рис. 2

Из-за меньших величин коэффициента поглощения на длине волны 0,72 мкм по сравнению с 0,55 мкм более низкие по величине значения получены для  $T_{эф2}$  – эффективной температуры для длины волны 0,72 мкм. Некоторое удивление может вызвать сравнение представленных выше численных данных для  $T_{эф1}$  в момент времени 0,97 с при нагреве плотностью потока  $q_1$  с результатами для момента времени 2,12 с при  $q_2$ , если посмотреть на кривые б на рис. 1. В последнем случае при любой координате температура выше, чем в первом, хотя соотношение между яркостными температурами противоположное. Причина заключается в том, что в первом случае объемная концентрация жидкости в двухфазной зоне больше из-за большего тепловыделения, а поскольку  $k_{liq}$  на два порядка больше, чем  $k_{sol}$ , интенсивность излучения и  $T_{эф1}$  в первом случае выше. Так как толщина двухфазной зоны мала, на этой стадии подводимая энергия в значительной мере расходуется на нагрев твердой фазы, находящейся под тончайшим слоем расплава. Однако с некоторого момента после полного расплавления двухфазной зоны энергия начинает в основном вкладываться в плавление и толщина расплава очень быстро увеличивается. Если двухфазная зона толщиной 7 мкм плавилась при двух указанных выше плотностях потока за время, соответственно равное 0,4 с и 1,07 с, то во второй стадии всего за 0,02 с толщина расплава увеличилась на 13 и 9 мкм. Согласно полученным результатам расчета значения эффективных температур на плато, обусловленном образованием двухфазной зоны, как и следовало ожидать, были близкими при различных значениях плотности потока греющего излучения. Отличие наблюдалось лишь в длительности плато (рис. 2). При больших плотностях потока греющего излучения плато вырождается в небольшой излом на зависимости эффективных температур от времени. Следует отметить, что если бы нагрев излучением был бы строго поверхностным, то фронт плавления, зародившись на поверхности, постепенно продвигался бы вглубь, толщина расплава постепенно бы росла и никаких особенностей на зависимости  $T_{эф}(t)$ , связанных с началом плавления, не было бы.

Поскольку в математической модели принималось, что  $k_{\lambda}$  в области полупрозрачности увеличивается скачком сразу в момент достижения температуры плавления, то перед началом плато расчет дал ступенчатое увеличение эффективных температур, обусловленное резким увеличением вклада поверхностного слоя в выходящую интенсивность излучения. Эффективные температуры на начальной стадии плавления с различными  $q$  при образовании двухфазной зоны близки и много меньше 2327 К из-за очень малой толщины двухфазного слоя и определяющего вклада более глубоких слоев в выходящее излучение.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 05-02-16290).

#### Список литературы

1 Petrov, V.A. Numerical simulation of concentrated laser radiation heating of refractory oxides / V.A. Petrov, V.E. Titov, A.Yu. Vorobyev // High Temp. – High Press. – 1999. – V. 31. – P. 267–274.

### ТЕПЛООБМЕН ПРИ ЛОБОВОМ НАТЕКАНИИ НА ОТВОД ТРУБЧАТОГО ЗМЕЕВИКА

Трубчатые змеевики широко используются как поверхности теплопередачи в разнообразных тепловых агрегатах, где осуществляется нагрев жидких и газообразных сред. Они являются основным рабочим элементом в огневых промышленных подогревателях нефтяных эмульсий. Продуктовый однопоточный змеевик в таких подогревателях выполняется из прямых труб, соединенных между собой крутоизогнутыми отводами (рис. 1). Соединение труб с отводами осуществляется обычно сваркой.

В подогревателях нефтяных эмульсий продуктовые змеевики размещаются в среде промежуточного теплоносителя (вода) или в канале с продуктами сгорания топлива (дымовыми газами). В последнем случае, при расположении прямых труб вдоль потока, осуществляется лобовое натекание продуктов сгорания на отвод. Конвективный теплообмен натекающего потока с отводом отличается большой неравномерностью. Он максимален в лобовой точке отвода и в центральном его диаметральном сечении. В направлении

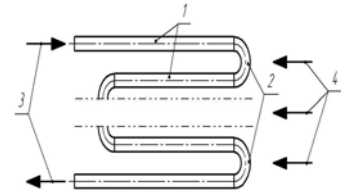


Рис. 1 Схема продуктового змеевика:

- 1 – прямые трубы; 2 – отводы;
- 3 – направление движения нагреваемого продукта;
- 4 – направление движения продуктов сгорания топлива

от центрального диаметального сечения к концам отвода интенсивность теплообмена уменьшается, стремясь к значениям для продольного обтекания трубы.

Организация тепловой работы подогревателя нефти должна не допускать превышения температуры  $t_{ст}$  стенки продуктовых труб сверх величины  $t_{ст}^{доп}$ , при которой активизируется процесс отложения кокса на внутренней поверхности стенки. Значение  $t_{ст}$  для незагрязненной стенки определяется, главным образом, внутренней и внешней задачами теплообмена (коэффициенты теплообмена нагреваемого продукта  $\alpha_n$  и дымовых газов  $\alpha_r$ ) и температурой дымовых газов  $t_r$ . Ограничение  $t_{ст} \leq t_{ст}^{доп}$  равносильно ограничению для температуры дымовых газов

$$t_r \leq t_{ст}^{доп} + (t_{ст}^{доп} - t_n) \alpha_n / \alpha_r, \quad (1)$$

которое следует из равенства величин плотности теплового потока на внешней и внутренней сторонах теплопередающей стенки ( $q_r = q_n$ , Вт/м<sup>2</sup>).

Величина  $t_{ст}^{доп}$  зависит от свойств нагреваемой нефти и для легких нефтей может достигать 300 °С. Для тяжелых, вязких нефтей она существенно меньше.

В промышленных подогревателях нефтяную эмульсию нагревают обычно не выше 90 °С и величина  $t_n$  определена технологией подготовки нефти. Вычисление коэффициентов  $\alpha_n$  и  $\alpha_r$  в уравнении (1) представляет собой самостоятельные, непростые задачи. Процесс теплопередачи лимитирует, прежде всего, величина  $\alpha_r$ , так как обычно  $\alpha_n > \alpha_r$ .

Рассмотрим вычисление коэффициента теплообмена  $\alpha_r$  дымовых газов при лобовом их натекании на отвод, исходя из упрощенных представлений об одинаковости температуры  $t_{ст}$  стенки отвода по всей его площади теплопередачи  $F$ . Постоянству  $t_{ст}$  по  $F$  в значительной степени способствует то обстоятельство, что из-за высоких давлений нагреваемого продукта толщина стенки трубы назначается относительно большой ( $\delta = 5 \dots 10$  мм). Поэтому с учетом растечек тепла посредством теплопроводности по стенке можно принять в первом приближении температуру стенки  $t_{ст}$  отвода постоянной по  $F$ . Кроме того, постоянству  $t_{ст}$  способствует и выполнение упомянутого выше условия  $\alpha_n > \alpha_r$ .

Принятое условие  $t_{ст} = \text{const}$  позволяет при вычислении  $t_r$  по (1) использовать средние значения  $\alpha_r$  для отвода. При поперечном обтекании трубы средний теплообмен продуктов сгорания топлива описан эмпирическим уравнением [1]

$$Nu = 0,28 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{0,36} \cdot \varepsilon_\varphi, \quad (2)$$

справедливым для интервала изменения числа Рейнольдса  $Re = wd / \nu = 10^3 \dots 2 \cdot 10^5$ . Здесь  $w$  – скорость набегающего потока;  $d$  – диаметр трубы;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости газа,  $Nu = \alpha_r d / \lambda$  – число Нуссельта;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности газа;  $Pr$  – число Прандтля газа;  $\varepsilon_\varphi$  – множитель, характеризующий изменение коэффициента теплообмена при обтекании трубы под углом  $\varphi$ .

Выполненная нами аппроксимация данных [1] привела к выражению

$$\varepsilon_\varphi = 1 - \exp(-0,04\varphi) \quad (3)$$

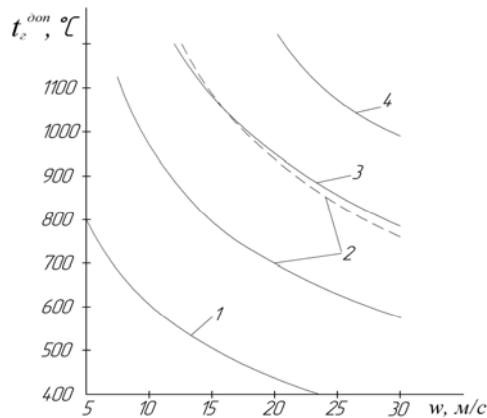
для интервала  $\varphi = 90 \dots 20^\circ$ .

Совместное рассмотрение уравнений (2) и (3) позволило получить для среднего теплообмена при лобовом натекании на отвод соотношение



$$\text{Nu}_{\text{отв}} = 0,224 \cdot \text{Re}^{0,6} \cdot \text{Pr}^{0,36} \quad (4)$$

Уравнение (4) использовалось для вычисления  $\alpha_r$  с целью определения допустимой температуры  $t_r^{\text{доп}}$  продуктов сгорания по выражению (1), исключающей активное коксование нефти на внутренней поверхности стенки отвода. Некоторые характерные результаты расчетов представлены на рис. 2. Теплофизические свойства продуктов сгорания при выполнении расчетов принимались по данным [1].



**Рис. 2** Зависимость  $t_r^{\text{доп}}$  от  $w$ :  $t_{\text{н}} = 80 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;  
 ——— 200 Вт/(м<sup>2</sup>·К); - - - - 300 Вт/(м<sup>2</sup>·К);  
 1 —  $t_{\text{ст}} = 150 \text{ } ^\circ\text{C}$ ; 2 — 200  $^\circ\text{C}$ ; 3 — 250  $^\circ\text{C}$ ; 4 — 300  $^\circ\text{C}$

Из рис. 2 видно, что с ростом скорости газов и, следовательно, коэффициента теплообмена  $\alpha_r$  допустимая их температура снижается. Это следует учитывать при интенсификации теплообмена с продуктовым змеевиком. Существенно увеличить  $t_r^{\text{доп}}$  можно за счет интенсификации теплообмена потока внутри отвода (пунктирная линия на рис. 2).

Полученные результаты важны для проектирования подогревателей нефти и их следует учитывать при выборе места размещения продуктовых змеевиков по тракту движения продуктов сгорания топлива.

#### Список литературы

- 1 Михеев, М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. — М. : Энергия. 1973. — 320 с.

**Ю.Я. Печенегов, Д.Ю. Серов, И.А. Махунов**

Технологический институт Саратовского государственного  
 технического университета (г. Энгельс)

### МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ НЕФТИ С РЕЦИРКУЛЯЦИЕЙ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ТОПЛИВА

Современная тенденция развития техники для нагрева нефтяных эмульсий на промыслах направлена на разработку сравнительно дешевых, конструктивно простых и мобильных нефтеподогревателей. Главным условием, определяющим тепловую схему подогревателей, является обеспечение «мягкого» режима нагрева нефти, при котором резко снижается или исключается коксование на внутренних стенках продуктовых труб. Благодаря этому повышается надежность работы аппарата и его долговечность.

Всю совокупность используемых технических приемов нагрева нефти в промышленных огневых подогревателях можно разделить на две самостоятельные группы: прямой нагрев через разделяющую стенку и косвенный нагрев с использованием промежуточного теплоносителя.

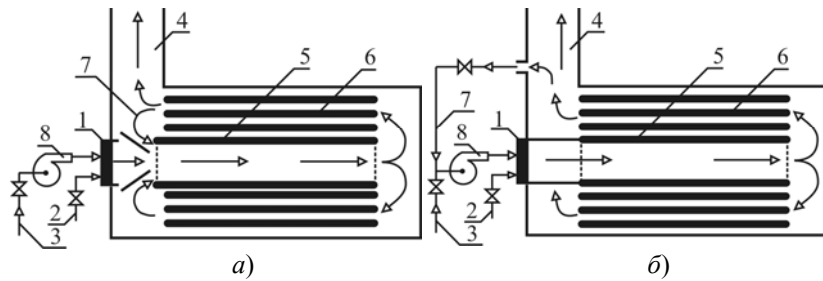
Наиболее простым и достаточно распространенным способом нагрева нефти в промышленных нефтеподогревателях является нагрев продуктами сгорания газа через разделяющую металлическую стенку. В этом случае условия «мягкого» режима нагрева могут обеспечиваться следующими способами: повышением интенсивности теплоотдачи со стороны нефтяной эмульсии; понижением температуры продуктов сгорания за счет разбавления их холодным воздухом или отходящими дымовыми газами, т.е. организацией рециркуляции.

Наиболее простым и перспективным способом представляется организация рециркуляции продуктов сгорания. Возможно осуществление как внутренней, так и внешней рециркуляции.

Внутренняя рециркуляция организовывается внутри пространства подогревателя (рис. 1, а).

Внешняя рециркуляция обеспечивается за счет установки вентилятора, с помощью которого осуществляется подача на горение части отходящих дымовых газов в смеси с атмосферным воздухом (рис. 1, б). При внешней рециркуляции возможно более точное регулирование кратности рециркуляции, чем при внутренней.

Радиантная секция нефтеподогревателя (рис. 1) представляет собой горизонтально ориентированный осесимметричный цилиндр, состоящий из совокупности расположенных по окружности продуктовых труб, соединенных между собой ребрами-проставками. Конвективная секция состоит из продольно обтекаемых газами продуктовых змеевиков.



**Рис. 1** Схема организации рециркуляции в нефтеподогревателе:  
 а – внутренняя рециркуляция; б – внешняя рециркуляция; 1 – горелочное устройство; 2 – подача топливного газа; 3 – подача атмосферного воздуха на горение; 4 – выброс продуктов сгорания в дымовую трубу; 5 – радиантная секция; 6 – конвективная секция; 7 – подача части отходящих дымовых газов на рециркуляцию; 8 – вентилятор

Целью данной работы являлось определение такого значения кратности рециркуляции продуктов сгорания, которое обеспечивает выполнение требования качественного сжигания топлива и соблюдение технологических условий нагрева продукта. Поиск оптимума производился по минимуму затрат на нагрев нефтяной эмульсии.

Оптимизация проводилась с учетом ограничений. Из опыта эксплуатации нефтеподогревателей известно, что интенсивное коксоотложение на стенках продуктовых труб начинается при температуре стенки  $t_{ст.н}$  около 250...300 °С, поэтому максимальная температура продуктов сгорания должна быть понижена за счет рециркуляции до определенного уровня, при котором  $t_{ст.н} < 300$  °С. Этому значению  $t_{ст.н}$  соответствует определенная величина кратности рециркуляции  $K_{рец. мин.}$ . Увеличение кратности рециркуляции повышает нагрузку на вентилятор и, соответственно, приводит к росту затрат электроэнергии  $Z_1$  на его привод.

При больших значениях  $K_{рец}$  в схеме с внешней рециркуляцией (см. рис. 1, б) газовая смесь в топочном пространстве характеризуется повышенным содержанием балласта и пониженной температурой. При существенном снижении температуры, а также при понижении содержания горючего компонента в газовой смеси полноценное сгорание топлива становится невозможным. Таким образом, в схеме с внешней рециркуляцией должно выполняться условие  $K_{рец. мин.} < K_{рец} < K_{рец. макс.}$ . В схеме с внутренней рециркуляцией указанное ограничение на  $K_{рец. макс.}$  отсутствует, так как на горение подается атмосферный воздух без газов рециркуляции.

Моделирование работы нефтеподогревателя производилось в обобщенном виде. В ходе расчета вычислялась величина площади теплообменной поверхности  $F_{рад}$  в радиантной и  $F_{конв}$  в конвективной зонах в расчете на сжигание 1 м<sup>3</sup>/с топливного газа. В качестве топливного газа был выбран оренбургский природный газ. Предварительный расчет проводился для условий отсутствия рециркуляции при принятых температурах газов на перевале  $t_n = 800$  °С и на выходе из подогревателя  $t_{вых} = 200$  °С. Для соблюдения адекватности сравнения тепловой работы подогревателя при наличии рециркуляции и в условиях ее отсутствия,  $t_n$  и  $t_{вых}$  рассчитывались так, чтобы площади поверхности теплообмена  $F_{рад}$  и  $F_{конв}$  не зависели от  $K_{рец}$ .

Таким образом, с увеличением  $K_{рец}$  изменялась температура и состав продуктов сгорания в радиантной и конвективной зонах подогревателя. С учетом этих изменений рассчитывались теплофизические свойства газов: теплоемкость, теплопроводность, вязкость, плотность и определялось изменение скорости их движения по газовому тракту. Это позволило вычислить лучистые  $\alpha_{л.рад}$ ,  $\alpha_{л.конв}$  и конвективные  $\alpha_{к.рад}$ ,  $\alpha_{к.конв}$  составляющие коэффициентов теплоотдачи с газовой стороны, а также их суммарные значения  $\alpha_{рад}$  и  $\alpha_{конв}$  для радиантной и конвективной зон подогревателя. Использовались известные расчетные уравнения, приведенные, например, в [1, 2].  $\alpha_{K0}$ , соответствующий  $K_{рец} = 0$ , вычислялся по следующему эмпирическому уравнению:

$$\alpha_{K0} = 1,19 \cdot \sqrt[4]{(\bar{T}_Г - \bar{T}_{ст}) / d_{тр}}$$

При  $K_{рец} > 0$  изменение  $\alpha_K$  определялось по формуле Михеева, которую после простых преобразований можно записать в форме, позволяющей исключить вычисление в явном виде скорости дымовых газов:

$$\alpha_K = \alpha_{K0} \left[ (1 + K_{рец}) \rho_G v_{G0} / (\rho_{r0} v_r) \right]^{0,8} (Pr_r / Pr_{r0})^{0,4} \lambda_r / \lambda_{r0}$$

Интенсивность лучистого теплообмена рассчитывалась по известным уравнениям:

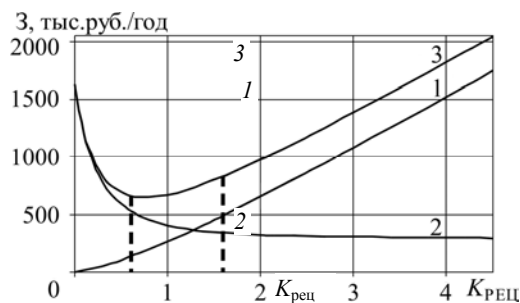
$$\alpha_{л.рад} = 0,23 \varepsilon_{\nu} \left[ (\bar{T}_Г / 100)^4 - (\bar{T}_{ст.труб} / 100)^4 \right];$$

$$\alpha_{л.конв} = 0,0256 \cdot \bar{T}_Г - 2,33.$$

В ходе математического моделирования проводились расчеты при кратности рециркуляции  $K_{рец} = 0...4,5$  и фиксированной стоимости 1 кВт · ч электроэнергии. Средняя температура нефти в конвективной зоне принималась 60 °С, а в радиантной – 80 °С. Расчеты показали, что имеются следующие ограничения на величину  $K_{рец}$ : при всех способах рециркуляции  $K_{рец. мин} = 0,6$ ; при внешней рециркуляции  $K_{рец. макс} = 1,6$ .

Оценка диапазона оптимальных значений  $K_{рец}$  основывалась на расчете затрат  $Z$  на работу подогревателя:  $Z = Z_1 + Z_2$ . Затраты  $Z_2$  состоят из стоимости подогревателя и текущих расходов (ремонт, амортизация, налоги), для расчета которых стоимость является базовым показателем. Очевидно, что величина  $Z_2$  связана с интенсивностью износа подогревателя и его сроком службы. На ос-

новании обобщения практических данных эксплуатации трубчатых нефтеподогревателей предложена зависимость числа лет  $\tau$  безотказной работы от температуры стенки  $t_{ст}$  продуктовой трубы:  $\tau = 100e^{-0,0115 \cdot t_{ст}}$ . Результаты оптимизации приведены на рис. 2.



**Рис. 2 Затраты на работу подогревателя:**

1 – затраты  $Z_1$  на работу электропривода вентилятора, осуществляющего рециркуляцию продуктов сгорания; 2 – затраты  $Z_2$  связанные со стоимостью подогревателя; 3 – суммарные затраты  $Z_3$ ;  
 ---- – границы диапазона допустимого изменения кратности рециркуляции  $K_{реци}$

Таким образом, составлена обобщенная математическая модель работы нефтеподогревателя. На основе проведенного расчета определен диапазон допустимых значений  $K_{реци} = 0,6 \dots 1,6$ , найдено оптимальное с технико-экономической точки зрения значение  $K_{реци} = 0,6 \dots 0,9$ .

#### Список литературы

- 1 Расчеты основных процессов и аппаратов нефтепереработки : справочник / под ред. Е.Н. Судакова. – М. : Химия, 1979. – 568 с.
- 2 Скобло, А.И. Процессы и аппараты нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности / А.И. Скобло, И.А. Трегубова, Ю.К. Молоканов. – М. : Химия, 1982. – 584 с.

**С.В. Пономарев, С.Н. Мочалин**

ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ДИФФУЗИИ ВЛАГИ В КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ

Предмет нашего исследования – разработка математических моделей косвенных методов для определения коэффициента диффузии. Нам потребуется математическое описание процесса измерения. На его основе мы будем строить расчетные зависимости для коэффициента диффузии.

При составлении математических моделей процесса измерения были приняты следующие допущения.

- 1 Продольные геометрические размеры образцов столь велики, что каждый из них можно считать полубесконечным телом.
  - 2 Боковые поверхности образцов настолько хорошо теплоизолированы, что распределение влагосодержания в этих образцах можно рассматривать как одномерное.
  - 3 Перед началом эксперимента влага распределена по образцам равномерно.
  - 4 Потенциал (выходной сигнал) датчика связан с влагосодержанием в образце монотонно возрастающей зависимостью.
  - 5 Образцы находятся в настолько плотном соприкосновении, что при совместном рассмотрении их можно считать единым телом.
  - 6 Все образцы изготовлены из одного и того же материала, однородного по своему составу и свойствам по всему объему.
  - 7 Разность начального влагосодержания в соединяемых образцах настолько мала, что зависимостью коэффициента диффузии от влагосодержания в ходе каждого эксперимента можно пренебречь.
  - 8 Эксперимент проводится при постоянной температуре.
- Разрабатываемые методы предусматривают проведение экспериментов в один или два этапа. Будем рассматривать первый и второй этапы проведения эксперимента и для каждого этапа составим математическую модель.

#### 1 Математическая модель метода измерения на первом этапе эксперимента.

Первый этап эксперимента начинается в момент времени, когда образцы № 1 и № 2 с начальными значениями влагосодержания  $U_1^H = \text{const}$  и  $U_0^H = \text{const}$  приводят в контакт друг с другом. В силу принятых допущений математическую модель процесса диффузии на первом этапе эксперимента запишем в виде линейного уравнения диффузии

$$\frac{\partial U_1(\tau_1, x)}{\partial \tau_1} = a_m \frac{\partial^2 U_1(\tau_1, x)}{\partial x^2}, \quad \tau \geq 0, \quad -\infty < x < +\infty, \quad (1)$$

с начальным условием

$$U_1(0, x) = \begin{cases} U_1^H, & -\infty < x \leq 0; \\ U_0^H, & 0 < x < +\infty, \end{cases} \quad (2)$$

где  $U_1(\tau_1, x)$  – влагосодержание в плоскости с координатой  $x$  в момент времени  $\tau_1$ ;  $a_m$  – искомый коэффициент диффузии;  $\tau_1$  – время, отсчитываемое с момента начала первого этапа;  $x$  – пространственная координата расположения датчика локального влагосодержания (расстояние от поверхности соприкосновения образцов до плоскости ПИП);  $U_0^H, U_1^H$  – начальные влагосодержания в образце № 2 и в образце № 1 соответственно.

Задача (1), (2) имеет аналитическое решение [1]

$$U_1(\tau_1, x) = U_c + (U_0^H - U_c) \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_m \tau_1}}\right), \quad -\infty < x < +\infty, \quad (3)$$

где  $U_c = \frac{U_0^H + U_1^H}{2}$  – среднее влагосодержание, остающееся неизменным в плоскости соприкосновения образцов.

### 2 Математическая модель метода измерения на втором этапе эксперимента.

После проведения первого этапа образцы № 1 и 2 разъединяют, и образец № 2 приводят в плотное соприкосновение с образцом № 3 с влагосодержанием  $U_0^H$ . Благодаря тому, что после первого этапа влагосодержание в образце № 2 в плоскости размещения ПИП выше, чем в образце № 3 ( $U_c > U_0^H$ ), влага диффундирует из образца № 2 в образец № 3. Таким образом, на втором этапе эксперимента в сечении  $x$  в течение некоторого времени до момента  $\tau_{2\max}$  происходит увеличение влагосодержания, а затем оно начинает постепенно уменьшаться.

На втором этапе эксперимента математическую модель запишем в виде

$$\frac{\partial U_2(\tau_2, x)}{\partial \tau_2} = a_m \frac{\partial^2 U_2(\tau_2, x)}{\partial x^2}, \quad \tau \geq 0, \quad -\infty < x < +\infty \quad (4)$$

где  $U_2(\tau_2, x)$  – влагосодержание в образцах;  $x$  – пространственная координата расположения датчика локального влагосодержания (расстояние от поверхности соприкосновения образцов до плоскости датчика);  $\tau_2$  – время, отсчитываемое с момента начала 2-го этапа (т.е. с момента соединения образцов № 2 и 3).

Начальным условием для уравнения (4) является распределение влажности в образцах № 2 и 3 перед началом второго этапа (для образца № 2 это распределение равно распределению в образце в конце 1-го этапа)

$$U_2(0, x) = \begin{cases} U_1(\tau_{1k}, x) = U_c + (U_0^H - U_c) \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_m \tau_{1k}}}\right), & 0 \leq x < +\infty; \\ U_0^H, & -\infty < x < 0. \end{cases} \quad (5)$$

Задача (4), (5) имеет аналитическое решение [1, 2]:

$$U_2(\tau_2, x) = \frac{1}{4} \left[ (U_1 - U_0) \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_m \tau_2}}\right) + 3U_0 + U_1 \right] + \frac{U_0 - U_1}{2\sqrt{\pi}} \int_{-\frac{x}{2\sqrt{a_m \tau_2}}}^{+\infty} e^{-u^2} \operatorname{erf}\left(\frac{x + 2u\sqrt{a_m \tau_2}}{2\sqrt{a_m \tau_{1k}}}\right) du. \quad (6)$$

### 3 Нахождение коэффициента диффузии по времени появления точки перегиба на первом этапе.

Для нахождения искомой расчетной зависимости  $a_m = a_m(\tau_n, x, U_0, U_1)$  необходимо решить уравнение

$$\frac{\partial^2 U_1(\tau, x)}{\partial \tau^2} = \frac{x^2}{a_m \tau_n^3} \exp\left(-\frac{x^2}{4a_m \tau_n}\right) \left(\frac{x}{8\sqrt{a_m \tau_n}} - 1\right) = 0,$$

которое выражает необходимое условие существования точки перегиба функции. В результате коэффициент диффузии  $a_m$

вычисляется по формуле  $a_m = \frac{x^2}{64\tau_n}$ .

#### 4 Нахождение коэффициента диффузии по времени появления точки максимума на втором этапе.

Суть метода измерения на втором этапе состоит в измерении времени  $\tau_{2\max}$  наступления максимального влагосодержания в образце № 2 на втором этапе эксперимента. Зная  $\tau_{2\max}$ , мы определяем искомый коэффициент диффузии. Подробности осуществления этого метода и результаты исследований приведены в [2].

#### 5 Вычисление коэффициента диффузии по моменту времени $\tau_\alpha$ достижения заданного соотношения влагосодержания $(U_2(\tau_\alpha, x) - U_2(0, x)) / (U_2(\tau_{2\max}, x) - U_2(0, x)) = \alpha$ .

Сущность этого метода заключается в измерении момента времени  $\tau_\alpha$ , в который достигается заданное значение соотношений влагосодержания

$$(U_2(\tau_\alpha, x) - U_2(0, x)) / (U_2(\tau_{2\max}, x) - U_2(0, x)) = (E_\alpha - E_0) / (E_{\max} - E_0) = \alpha.$$

Зная  $\tau_\alpha$ , искомый коэффициент диффузии вычисляется по достаточно простому алгоритму.

#### Список литературы

- 1 Лыков, А.В. Теория тепло- и массопереноса / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. – М.–Л. : Госэнергоиздат, 1963. – 536 с.
- 2 Толстых, С.Г. Разработка метода и устройства для измерения коэффициента диффузии влаги в капиллярно-пористых материалах : дис. ... канд. техн. наук / С.Г. Толстых. – Тамбов, 2004. – 240 с.

*Э.Ш. Тауров, М.М. Сафаров, Т.Р. Тиллоева,  
М.С. Сайдуллаева*

Таджикский технический университет им. М.С. Осими (г. Душанбе)

### РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КАТАЛИЗАТОРОВ СИСТЕМЫ (Ni + Al) И (Al + Cu)

Природа и состав растворителя оказывают существенное влияние на скорость и селективность жидкофазных гетерогенно-каталитических процессов. Нами проведен комплекс исследований, направленных на выяснение причин влияния растворителя на закономерности адсорбции и активации водорода и органических соединений поверхностью никелево-алюминиево-медных катализаторов, скорость и селективность реакций жидкофазной каталитической гидрогенизации замещенных спиртов. Независимо от природы и состава растворителя процесс адсорбции органических соединений на никель-алюминиевых катализаторах протекает по механизму объемного заполнения пористого пространства катализатора, а влияние среды проявляется в изменении основных термодинамических и теплофизических характеристик адсорбционных равновесий. Предложен механизм процессов адсорбции органических соединений на каталитически активных металлах с разветвленной пористой структурой. Изменения адсорбционной способности реагирующих веществ под действием растворителя оказывают существенное влияние на скорость и селективность реакций жидкофазной гидрогенизации. Полученные данные составляют основу методов научно-обоснованного подбора оптимальных каталитических систем для реакций жидкофазной гидрогенизации. Анализ полученных данных показывает, что нагрев при постоянном высоком давлении оказывает значительное влияние на структуру объемного растворителя. В растворах происходит разрушение тетраэдрической сетки водородных связей воды, которое сопровождается значительным сокращением количества межмолекулярных водородных связей и увеличением числа молекул свободного растворителя. Рост температуры приводит к существенному разрушению первых гидратных оболочек катионов. С увеличением температуры координационные числа анионов возрастают.

Исследование теплоемкости исследуемых систем в широком интервале температур и концентраций имеет важное значение для создания теории явлений переноса в конденсированном состоянии вещества безотносительно к кристаллической структуре и для выяснения роли структурного разупорядочения в формировании энергетического спектра носителей заряда.

Нами разработаны экспериментальные методы для исследования теплоемкости и энтальпии сплавов в широком температурном интервале. Установка состоит из толстостенного цилиндрического стакана, изготовленного из нержавеющей стали. На боковой поверхности стакана нарезается винтовое углубление, в которое вставляется нихромовая спираль определенного сопротивления. Спираль играет роль нагревателя, позволяющего повысить температуру стакана до 673 К, т.е. получить необходимый интервал температур, в котором предполагается измерять теплоемкость засыпок. Температура стакана и температура находящегося в его полости образца относительно льда записывается графопостроителем.

Общая относительная погрешность измерения теплоемкости при доверительной вероятности  $a = 0,95$  составляет 3,0 %.

*М.Б. Акрамов, Б.Б. Эрзолов*

Таджикский алюминиевый завод Республики Таджикистан

## ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШАМОТНЫХ ОГНЕУПОРНЫХ КИРПИЧЕЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ФУТЕРОВКЕ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ С ОБОЖЖЕННЫМИ АНОДАМИ

В Таджикском алюминиевом заводе продолжают проводиться испытания по разработке технологии применения изделий и материалов из местных минеральных ресурсов. В частности нашими специалистами изготовлена экспериментальная партия шамотных огнеупорных кирпичей на основе шамота и огнеупорной глины Чашмасангского месторождения Республики Таджикистан.

Огнеупорные глины Чашмасангского месторождения из 1 и 11-го пластов имеют следующий химический состав (в %):  $\text{SiO}_2$  – 67,14 ... 70,46;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 22,62 ... 23,64;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 2,25 ... 3,58;  $\text{TiO}_2$  – 0,65 ... 0,67;  $\text{MgO}$  – 0,35 ... 0,62;  $\text{CaO}$  – 0,4 ... 0,48;  $\text{K}_2\text{O}$  – 2,28 ... 2,64;  $\text{Na}_2\text{O}$  – 0,09 ... 0,12;  $\text{P}_2\text{O}_5$  – 0,04 ... 0,05;  $\text{SO}_3$  – 0,13 ... 0,14;  $\text{CO}_2$  – 0,32 ... 0,73;  $\text{H}_2\text{O}$  – 0,31 ... 0,38.

По содержанию  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 22,62 ... 23,64;  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$  – 2,9 ... 4,25; выходе фракции < 0,01 мм – 39 ... 5 %; температуре плавления – 1610 ... 1800 °С гидрослюзисто-каолинитового состава технологические пробы глины характеризуются как сухарные полукислые низкодисперсные со средним содержанием красящих окислов огнеупорные глины (ГОСТ 9169–75). Такой тип глин является сырьем для производства полукислых огнеупорных и других керамических изделий.

Гранулометрический состав шамотной крошки, изготавливаемого боя вторсырья (бой кирпичей марок МЛС, МКРА, ШБ, ВГ), подбирался опытным путем.

В шихте соотношение шамотной крошки и огнеупорной глины составило 1 : 1. Шихта после гомогенизации в смесителе увлажнялась до 12 % и вновь перемешивалась. Формование изделий проводили полусухим прессованием (влажность 0 %) при давлении в пресс-форме 150 кгс/см<sup>2</sup>. Сушка сырца проводилась при температуре 50 ... 70 °С в сушильной камере, нагреваемой отходящими газами из печи обжига в течение двух суток. Обжиг кирпича сырца проводили в туннельной печи с исходной влажностью не более 3 % с постепенным повышением температуры, толкание вагонетки проводили через 2,5 часа. В зоне окончательного обжига температура составила 1250 ... 1300 °С.

Обожженные опытно-экспериментальные партии кирпичей имеют стандартные размеры, без дефектов и отклонений от норм; цвет кирпичей от бежевого до коричневого.

Анализы испытания кирпичей, проведенные в центральной заводской лаборатории и ОТК завода, показали следующие результаты.

Образцы кирпичей с использованием глин от 1-го пласта:

$\text{Al}_2\text{O}_3$  – 33,5 %;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 3,89 %, открытая пористость – 21,6 %.

Потеря массы при прокаливании (ППП) – 0,76.

Механическая прочность при сжатии – 204 кгс/см<sup>2</sup>.

Образцы кирпичей с использованием глин с 3-го пласта:

$\text{Al}_2\text{O}_3$  – 32,2 %;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 3,6 %; откуда пористость – 23,3 %; PPP – 0,37.

Механическая прочность на сжатие – 237 кгс/см<sup>2</sup>.

По этим нормативным показателям полученные экспериментальные партии кирпичей согласно ГОСТ 390–83 отвечают шамотным изделиям марки ШБ, 1 и 2 категории качества.

Этими экспериментальными кирпичами зафутерованы и запущены в работу около 30 электролизеров. Эти электролизеры находятся под наблюдением наших специалистов.

Известно, что футеровка алюминиевых электролизеров сохраняется не весь период эксплуатации. Мощные электролизеры нередко останавливаются досрочно на капитальный ремонт по причине разрушения футеровки. Причина такого явления – повышенные тепловые нагрузки.

Для изучения температурных и тепловых полей катодного устройства необходимо определить теплофизические характеристики зафутерованных материалов и кирпичей, использованных в катодном устройстве.

Теплофизические характеристики (теплопроводность, тепло-емкость, температуропроводность, термические коэффициенты линейного и объемного расширений) являются важнейшими параметрами огнеупоров, определяющими в значительной мере их расход, область применения, температуру применения, конструкцию и качество работы тепловых агрегатов промышленности, поэтому нами измерены выше-указанные характеристики огнеупорных шамотных кирпичей.

Измерения проводились на установках кафедры «Теплотехника и теплотехническое оборудование» Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими.

Для измерения использованы установки заводского изготовления: «Измеритель теплоемкости ИТС-400» и «Измеритель теплопроводности ИТЛ-400».

Анализ возможных ошибок при измерениях показал, что общая относительная погрешность измерения при доверительной вероятности 0,95 не превышает 9 %.

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ПРОЦЕССЕ РЕГЕНЕРАЦИИ ВОЗДУХА**

В практике использования коллективных и индивидуальных средств регенерации воздуха широко представлены процессы, протекающие в пористых системах (в насыпных слоях зеренных регенеративных продуктов), внутри которых происходят физико-химические превращения, сопровождающиеся выделением теплоты.

Для упрощения математической модели рассматривался проточный вариант работы патрона РП-4 (с насыпным зеренным продуктом), при котором поток газовой смеси, обогащенной углекислым газом, подавался на вход патрона с постоянным расходом.

Краевая задача теплопереноса в цилиндрической системе координат запишется в виде

$$(c_3 \rho_3) \frac{\partial T(r, z, \tau)}{\partial \tau} = \lambda_3 \left( \frac{\partial^2 T(r, z, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, z, \tau)}{\partial r} \right) - w(c_3^r \rho_3^r) \frac{\partial T(r, z, \tau)}{\partial z} + q_v(z, \tau), \quad z > 0, 0 < r < R_0, \tau > 0. \quad (1)$$

Начальные условия

$$T(r, z, 0) = T_0. \quad (2)$$

Граничные условия

$$\frac{\partial T(0, z, \tau)}{\partial r} = 0; \quad (3)$$

$$T(r, 0, \tau) = T_{\text{вх}}(r, \tau); \quad (4)$$

$$-\lambda_3 \frac{\partial T(R_0, z, \tau)}{\partial r} = \alpha(T(R_0, z, \tau) - T_c). \quad (5)$$

В задаче (1)–(5) использовались следующие обозначения:

$c_3 \rho_3 = [c^{\text{ш}} \rho^{\text{ш}} (1 - \varepsilon^{\text{ш}}) + c^r \rho^r \varepsilon^{\text{ш}}]$  – эффективная объемная теплоемкость пористого слоя шихты, где  $c^{\text{ш}} \rho^{\text{ш}}$ ,  $c^r \rho^r$  – объемная теплоемкость частиц шихты и газа соответственно;  $\varepsilon^{\text{ш}}$  – порозность слоя шихты;  $\lambda_3 = [\lambda^{\text{ш}} f^{\text{ш}} + \lambda^r (1 - f^{\text{ш}})]$  – коэффициент эффективной теплопроводности пористого слоя шихты, где  $\lambda^{\text{ш}}$ ,  $\lambda^r$  – теплопроводность шихты и газа соответственно;  $f^{\text{ш}}$  – усредненная доля площади, занимаемой частицами шихты;  $c_3^r \rho_3^r = c^r \rho^r (1 - f^{\text{ш}})$  – эффективная теплопроводность газа, отнесенная к единице объема шихты;  $q_v = q(x, y, z, \tau) (1 - \varepsilon^{\text{ш}})$  – объемная мощность внутренних источников тепла, отнесенная к единице объема шихты;  $\alpha$  – коэффициент теплообмена с внешней средой;  $T_c$  – температура среды;  $T(R_0, z, \tau)$  – функция распределения температуры на внешней поверхности патрона;  $R_0$  – радиус патрона;  $w$  – скорость потока газа;  $q(x, y, z, \tau)$  – объемная мощность внутренних источников теплоты;  $T_{\text{вх}}(r, \tau)$  – температура на входе патрона.

Было проведено экспериментальное исследование температурных полей внутри цилиндрического регенеративного патрона. Для проведения испытаний был изготовлен макет патрона с введенными внутрь термомпарами.

Результаты испытаний показали, что в период интенсивного протекания химической реакции регенерации температура в одном и том же сечении не зависит от радиальной координаты  $r$ . В этом случае дифференциальное уравнение теплопроводности (1) может быть записано в виде

$$(c_3 \rho_3) \frac{\partial T(z, \tau)}{\partial \tau} = -w(c_3^r \rho_3^r) \frac{\partial T(z, \tau)}{\partial z} + q_v(z, \tau) - \frac{2\alpha}{R} (\bar{T}(z, \tau) - T_c),$$

где  $\bar{T}(z, \tau)$  – среднеинтегральная по сечению температура.

Однако при дальнейшем проведении процесса, когда мощность внутренних источников теплоты стремится к нулю, предпочтительнее использовать дифференциальное уравнение (1) с  $q_v(z, \tau) = 0$ .

*М.П. Беляев*

**НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ВЛАГОПРОВОДНОСТИ МОНОЛИТНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Качество формованных строительных материалов во многом определяется пористой структурой изделия, высокочувствительным индикатором которой является влажностеплопроводность.

Большинство известных методов определения влажностеплопроводности малопродуктивны, связаны с разрушением изде-

лия с целью подготовки образцов заданных размеров, а применяемые электрофизические преобразователи влажности нуждаются в индивидуальной градуировке.

Предлагаемый метод может быть использован для определения коэффициента диффузии влаги в формованных изделиях, имеющих по крайней мере одну плоскую поверхность. Существо метода заключается в следующем. В изделии создается равномерное начальное влагосодержание, причем, наиболее просто оно формируется в обычных комнатных условиях при стабилизации относительной влажности воздуха. К плоской поверхности образца прижимается зонд с линейным источником массы и расположенными параллельно ему электродами гальванического преобразователя, имеющего однозначную зависимость выходной характеристики (ЭДС) от влагосодержания материала. После подачи импульса влаги фиксируется изменение ЭДС гальванического преобразователя во времени, определяется момент достижения максимума на кривой изменения ЭДС и по нему рассчитывается коэффициент диффузии влаги. Последнее возможно вследствие монотонной зависимости ЭДС гальванического преобразователя от влагосодержания в гигроскопической области состояния исследуемого материала. В расчетную формулу определения коэффициента диффузии влаги входит значение расстояния  $r_0$  от точки контроля изменения влагосодержания до линейного источника массы, причем, во второй степени. Поэтому толщина информативного слоя, определяющего выходную характеристику локального измерителя влагосодержания, должна быть минимизирована, что обеспечивается применением именно гальванических преобразователей.

Разработанный метод и реализующее его устройство апробированы на модельных изделиях из двухводного гипса, а также на ряде формованных строительных материалов.

*М.П. Беляев*

ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

## **К ВОПРОСУ О НЕРАЗРУШАЮЩЕМ ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БУМАГИ**

В результате движения сетки при отливе бумаги волокна ориентируются в направлении движения сетки. Поэтому бумага характеризуется анизотропией свойств в зависимости от направления. В целом ряде случаев необходимо точно знать направление отлива бумаги. Например, этикетку на бумажном листе нужно располагать так, чтобы поперечное направление бумаги совпадало с осью бутылки.

Для определения машинного и поперечного направления в листе бумаги используются методы, предполагающие разрушение листов бумаги с целью приготовления образцов. Они характеризуются, кроме того, значительной продолжительностью, не позволяющей проводить высокопроизводительный экспресс-контроль качественных показателей бумаги.

Нами для построения метода неразрушающего экспресс-контроля качественных показателей бумаги использовался зонд с импульсным источником массы и расположенными на концентрических окружностях от источника электродами гальванических преобразователей.

Исследуемый листовый материал с равномерным начальным распределением влаги помещался на плоскую подложку из несмачиваемого водой материала (фторопласта). К поверхности исследуемого материала прижимался зонд, формировался импульс массы и измерялась ЭДС гальванических преобразователей, расположенных в машинном и поперечном направлениях на заданном расстоянии от точечного источника массы. По кривым изменения ЭДС гальванических преобразователей во времени, учитывая монотонность зависимости ЭДС этих преобразователей от влагосодержания бумаги, рассчитывались коэффициенты диффузии влаги в машинном и поперечном направлениях бумаги. Это позволило без проведения длительных дорогостоящих операций по индивидуальной градуировке измерителей влажности по каждому сорту бумаги определять не только машинное и поперечное направления, но и количественно оценивать различия свойств бумаги в указанных направлениях по соответствующим значениям коэффициента диффузии влаги.

*С.О. Дмитриев, А.О. Дмитриев*

ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

## **ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК\***

В последние годы заметно возрос интерес к изучению путей и возможностей применения частиц нанометровых размеров в различных областях современной техники. В данном случае несомненный интерес представляют углеродные нанотрубки (УНТ) как наиболее перспективные объекты, позволяющие создавать материалы с удивительными свойствами [1].

УНТ обладают уникальными характеристиками: высокой прочностью; хорошими электропроводностью и адсорбционными свойствами; химической и термической стабильностью и др. В настоящее время получено большое число модификаций УНТ, отличающихся количеством слоев, размерами, формой каркасной структуры, а, следовательно, и свойствами. Тем не менее, свойства этих материалов, в силу их уникальности и новизны, изучены не достаточно, а во многих случаях совершенно не изучены. В данной работе представлены результаты исследований теплофизических характеристик углеродного наноструктурного материала «Таунит», полученного в ТГТУ. УНТ «Таунит» представляет собой одномерные наномасштабные нитевидные образования поликристаллического графита в виде сыпучего порошка черного цвета. Гранулы микрометрических размеров имеют структуру спутанных пучков многостенных нанотрубок.

Исследования теплофизических характеристик углеродного наноструктурного материала «Таунит» проводили с помо-

\* Работа выполнена под руководством д-ра техн. наук профессора О.С. Дмитриева и д-ра техн. наук профессора А.Г. Ткачева



щью информационно-измерительной системы (ИИС) процесса отверждения композитов [2]. ИИС позволяет проводить исследование образцов в диапазоне температур от 20 °С до 250 °С под давлением до 1 МПа. Возможность создания давления на образец в эксперименте позволила исследовать наряду с температурной зависимостью, также и зависимость ТФХ УНТ от давления.

В основу метода определения ТФХ углеродного наноструктурного материала объемной теплоемкости  $C(T)$  и теплопроводности  $\lambda(T)$  в зависимости от температуры  $T$  при различном давлении  $P$  положено решение обратной задачи теплопроводности, полученное методом интегральных характеристик.

Экспериментальное исследование и получение исходных данных для определения ТФХ УНТ заключаются в нагреве образца исследуемого материала в измерительном устройстве ИИС с измерением и регистрацией изменения во времени температуры в нескольких точках по толщине образца, граничных тепловых потоков, толщины и давления.

Вследствие того, что углеродные нанотрубки представляют собой сыпучий порошок, для его исследования необходима была доработка измерительной ячейки, предназначенной для исследования твердых или достаточно мягких, но сохраняющих форму образцов. Для этого была изготовлена специальная рамка из эластичного термостойкого материала, которая при экспериментальном исследовании помещалась в измерительную ячейку. Внутри рамки насыпался углеродный наноструктурный материал и прикладывалось усилие с помощью ручного микропресса. Таким образом, был сформирован исследуемый образец, представляющий собой в тепловом отношении пластину размерами 100×100×10,4 мм. Эластичность рамки позволила создавать давление на образец УНТ и уплотнять его от состояния насыпной плотности до состояния сформованного брикета. Усилие на образец в экспериментах изменяли от 3 до 1000 кг. При этом толщина образца уменьшалась от 10,4 до 8,0 мм, а плотность от 0,42 до 0,56 г/см<sup>3</sup>. Наличие рамки в измерительной ячейке несколько изменяло теплоперенос при экспериментальном исследовании, поэтому была проведена дополнительная настройка измерительного устройства с рамкой.

Таким образом, впервые исследованы теплофизические характеристики углеродного наноструктурного материала «Таунит» в зависимости от температуры и плотности.

#### Список литературы

- 1 Чеховой, А.Н. Нанотехнологии: новый этап в рациональном природопользовании / А.Н. Чеховой // Интеграл. – 2004. – № 5 (19). – С. 145–154.
- 2 Дмитриев, А.О. Интегрированная информационно-измерительная система исследования свойств полимерных композитов в процессе отверждения / А.О. Дмитриев, С.О. Дмитриев // В этом сборнике.

*М.А. Зарипова, Х.А. Зоиров, А.Б. Бадалов, М.М. Сафаров*

Таджикский технический университет им. М.С. Осими (г. Душанбе)

#### **УДЕЛЬНАЯ ИЗОБАРНАЯ ТЕПЛОЕМКОСТЬ И ЭНТАЛЬПИИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ЭТИЛГИДРАЗИНА**

Для разработки ряда технологических процессов и осуществления основ получения материалов с заранее известными физическими параметрами требуется, в первую очередь, знание термических, калорических и термодинамических свойств этих веществ в широком интервале температур и давлений.

Особенностью подавляющего большинства направлений новой техники является интенсификация рабочих процессов, где исключительно важную роль начинают играть тепловые явления, протекающие при высоких температурах и больших давлениях.

Уровень развития промышленности характеризуется не только объемом производства и ассортиментом выпускаемой продукции, но и показателями ее качества. Показателями качества продукции в числе других технических характеристик являются и их теплофизические и термодинамические свойства.

Для совершенствования и оптимизации технологических процессов необходимы научно обоснованные инженерные расчеты, которые нуждаются в информации о теплофизических и термодинамических свойствах рабочего вещества в широкой области изменения параметров состояния. Использование ориентировочных или даже приближенных данных по свойствам веществ в инженерных расчетах приводит к существенному завышению металлоемкости установок и снижению их технико-экономических показателей.

В связи с этим, дальнейшее уточнение теплофизических и термодинамических данных рабочих веществ представляет собой значительный резерв совершенствования технологического процесса.

Появился целый ряд новых технологических процессов, протекающих при высоких температурах и давлении, что послужило основанием для совершенствования и интенсификации ранее существующих процессов, применяемых в химической, нефтехимической, топливной, нефтеперерабатывающей промышленности с крупнотоннажным производством.

В полуфабрикатах и готовой продукции нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности важное место принадлежит водным растворам этилгидразина. Теплофизические и термодинамические свойства водных растворов этилгидразина имеют большое научное и практическое значение и относятся к числу основных физико-химических величин, характеризующих свойства жидкостей и входящих в качестве основных параметров в уравнения гидродинамики и теплообмена при расчетах и проектировании процессов и аппаратов. Изучение термодинамических свойств растворов в значительной степени способствует развитию и совершенствованию современной теории жидкого состояния, выяснению механизма меж-

молекулярного взаимодействия в жидкостях. Поэтому результаты исследования плотности и удельной теплоемкости легли в основу современной молекулярно-кинетической теории газов и жидкостей. Имея уравнение состояния, составленное на основе данных о плотности, можно рассчитать ряд калорических свойств веществ: теплоемкость, энтропию, энтальпию, тепло парообразования и другие.

Целью данного сообщения является исследование термодинамических свойств водных растворов этилгидразина 10 – 90 % мол. в интервале температуры 293 – 546 К и давления 0,101 – 49,1 МПа.

*М.А. Зарипова, Т.Р. Тиллоева, Э.Ш. Тауров,  
М.М. Сафаров*

Таджикский технический университет им. М.С. Осими (г. Душанбе)

## ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И ПЛОТНОСТЬ АЛКИЛЗАМЕЩЕННЫХ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

Широкое применение водных растворов в современной технологии требует знания их термодинамических и теплофизических свойств. Решить эту проблему экспериментальным путем невозможно из-за все возрастающего количества объектов исследования, в связи с чем необходимо применение расчетно-теоретических методов прогноза термодинамических и теплофизических свойств веществ. Обобщенные зависимости и эмпирические уравнения состояния, разработанные для какой-либо группы вещества, малоприменимы для широкого их применения к веществам за пределами этой группы.

Цель настоящей работы – анализ и обобщение экспериментальных данных по теплопроводности и плотности водных растворов метилгидразина в зависимости от температуры при атмосферном давлении.

Гидразиномзамещенные органические содержат до четырех органических остатков в молекуле гидразина (Г). Различают: 1) монозамещенные, *сим*- и *несим*-дизамещенные, три- и тетразамещенные Г, содержащие алифатический (алкилгидразины), ароматический (арилгидразины) или гетероциклический. Остатки в Г: *сим*-дизамещенные Г, названные также гидразосоединениями, например гидразобензол (см. табл.); 2) гидразиды – моно- и диацетилзамещенные Г, соответствует первичные RCONHNH<sub>2</sub> и вторичные RCONHNHCOR; 3) гидразоны и *азины* – производные Г. Соответственно с одной и двумя молекулами альдегида или кетона RR'C=NNH<sub>2</sub> в RR'C=NN=CRR' (где R-Alk, Ar; R'=H, Alk, Ar). Некоторые свойства алкил- и арилзамещенных гидразинов представлены в [1].

Низшие алкилгидразины (до C<sub>11</sub> – гигроскопичные, дымящие на воздухе, весьма агрессивные (разъедают кожу, каучук, отчасти даже стекло) жидкости со специфическим запахом; растворяются в спирте, эфире и воде (с разогреванием). Высшие – кристаллические вещества. Колебательные и ЯМР-спектры низших алкилгидразинов свидетельствуют о наличии межмолекулярной ассоциации с большей энергией (8–10 кДж/моль), чем в Г. В масс-спектрах всех алкилгидразинов надежно регистрируются молекулярные ионы, которые благодаря делокализации положительны.

### Свойства алкил- и арилзамещенных гидразинов

| Соединение  | $T_{\text{кип.}}^{\circ\text{C}}$ | $T_{\text{пл.}}^{\circ\text{C}}$ | $d_4^{20}$ | $n^{20}$ | pK   | $\Delta H_{\text{раст. в воде}}$ , кДж/моль |
|---|-----------------------------------|----------------------------------|------------|----------|------|---|
| Метилгидразин*<br>CH <sub>3</sub> NHNH <sub>2</sub>                                     | 87,5                              | -52,4                            | 0,873      | 1,4328   | 7,87 | 26  |
| Этилгидразин<br>C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> NHNH <sub>2</sub>                         | 100                               | -                                | 0,847      | 1,4308   | 7,91 | 44  |
| Диметилгидразин*<br>(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> NNH <sub>2</sub>                    | 63                                | -57                              | 0,791      | 1,4084   | 7,21 | 25  |
| Триметилгидразин<br>(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> NNHCH <sub>3</sub>                  | 59,5                              | -                                | 0,772      | 1,4031   | 6,58 | 33  |
| Тетраметилгидразин<br>(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> NN(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> | 74,2                              | -                                | 0,772      | -        | 6,10 | 42  |
| Фенилгидразин<br>C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> NHNH <sub>2</sub>                        | 243,5                             | 19,6                             | 1,098      | -        | 5,27 | -   |
| Гидразобензол<br>C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> NHNHC <sub>6</sub> H <sub>5</sub>        | Разл.                             | 131                              | 1,158      |          |      |   |

\* Значения  $\Delta H_{\text{обр}}^{\circ}$  (в кДж) и вязкость  $\eta^{25}$  (в мПа · с) для метил- и *несим*-диметилгидразинов составляют соответственно -53 и 0,893, -53,5 и 0,51.

Заряды между обоими атомами N распадаются в дальнейшем не по связи N–N, а по связям β–СС или CN. Моно- и диалкилгидразины –основания той же силы, что и Г; три- и тетраалкилгидразины значительно менее основны. С кислотами алкилгидразины образуют кислые и нейтральные соли. Хорошо кристаллизуются обычно гидросульфаты, оксалаты, нитраты. Гидрохлориды низших моноалкилгидразинов весьма гигроскопичны и не имеют четких температур плавления, а гидрохлориды аралкилгидразинов кристаллизуются легко.

## Список литературы

1 Химическая энциклопедия : в 5 т. Т. 1 : А-Дарзана / ред. кол. : И.Л. Кнунянц (гл. ред.) и др. – М. : Советская энциклопедия, 1988. – 623 с.

*С.Г. Ильина, А.В. Никулин*

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

### **ПОКАЗАТЕЛЬ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ЖИДКОСТЬ – ПАР СИСТЕМЫ МЕТАНОЛ – ГЕПТАН В ОКРЕСТНОСТИ КРИТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ**

Известно [1, 2], что в бинарной жидкой системе метанол – гептан ( $T_c = 52,2$  °С) имеет место фазовый переход смачивания на границе жидкость – стенка. Это явление состоит в том, что при  $T \sim 43$  °С появляется смачивающий слой нижней фазы, обогащенный метанолом, между верхней фазой и стенкой кюветы (эффект «вторгшегося» слоя). В настоящей работе нами изучается также граница раздела жидкость – пар в окрестности критической температуры смешения.

Показатель преломления сосуществующих фаз измеряется методом критического угла на модифицированном рефрактометре Пульфриха, при этом зондирующий луч направляется вдоль вертикальной стенки кюветы и преломляется из каждой фазы в измерительную призму. Измеряются углы выхода преломленных лучей ( $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ ). Измерения проводились в двух тепловых режимах: нагревание и охлаждение, так как в предыдущих работах было выявлено различное поведение системы при разных режимах.

Была получена кривая сосуществования системы метанол – гептан в пределах температур от 23 до 56,6 °С при обоих режимах, одновременно регистрировался сигнал, соответствующий слою на границе раздела жидкость – пар. Наблюдения в режиме нагревания показали, что этот слой, в свою очередь, состоит из двух слоев, как и объемный образец, но показатель преломления его несколько ниже объемных значений, т.е. «поверхностная» кривая смещена относительно «объемной». В режиме охлаждения наблюдается только одна ветвь смещенной «поверхностной» кривой сосуществования. Результаты эксперимента были обработаны по методу Л.А. Благонравова [3], что облегчает интерпретацию.

## Список литературы

- 1 Ильина С.Г., Ревина Е.Н. // Вестник Московского Университета. Серия 3 (Физика, Астрономия). – 2003. – № 3. – С. 22.
- 2 Ильина С.Г., Ионова Э.А., Павлыгина О.Г. // Вестник Московского Университета. Серия 3 (Физика, Астрономия). – 1999. – № 4. – С. 28.
- 3 Благонравов Л.А. // Журнал физической химии. – 2002. –Т. 76, № 1. – С. 70–75.

*О.Ю. Кулешов, В.М. Седёлкин*

Технологический институт Саратовского государственного  
технического университета (г. Энгельс)

### **К РАСЧЕТУ ЛОКАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИАЦИОННОГО И СЛОЖНОГО ТЕПЛООБМЕНА В РАМКАХ ЗОНАЛЬНОГО МЕТОДА**

Зональный метод расчета радиационного и сложного теплообмена в настоящее время является наиболее эффективным инструментом инженерного анализа тепловых режимов работы высокотемпературных установок в силу выгодного сочетания базовых свойств – высокой точности расчета радиационного теплообмена, гибкости расчетного алгоритма, высокой вычислительной экономичности. Однако зональный метод изначально не предназначен для вычисления локальных характеристик теплообмена и здесь имеются определенные сложности.

Вычисление локальных характеристик радиационного теплообмена в рамках зонального подхода основано на определении локальных обобщенных угловых коэффициентов излучения с зон расчетной области на тепловоспринимающую единичную площадку  $dF$ . Локальные обобщенные угловые коэффициенты обычно вычисляются на базе местных обобщенных угловых коэффициентов (с единичной площадки  $dF$  на зоны расчетной области) с использованием соотношений взаимности. Однако для зональных методов расчета сложного теплообмена в рабочих камерах печей и агрегатов бывает довольно сложно (а иногда невозможно) сформулировать эти правила взаимности. Основным ограничивающим условием для указанных технических систем является обязательный диффузный характер излучения граничных поверхностей, в том числе эффективных – горелочных устройств, ламповых излучателей и т.п. Кроме того, определенная формулировка зонального метода (а их известно несколько) ведет к конкретному виду соотношений взаимности, что не всегда корректно учитывается.

В данной работе предложен метод вычисления локальных лучистых тепловых потоков в рамках зонального подхода, основанный на непосредственном интегрировании интенсивности излучения по телесному углу в узле  $M$ , связанном с тепло-

воспринимающей единичной площадкой  $dF$ . При этом среднезональные оптико-геометрические и тепловые характеристики, вычисленные на предыдущем этапе расчета, используются в условиях однозначности и замыкающих соотношениях задачи локального радиационного переноса.

В алгоритме решения используется вероятностное моделирование излучения, когда расчетный узел  $M$  испускает лучи равномерно по всем направлениям (в равных телесных углах, заданных площадками на единичной полусфере с центром в узле  $M$ ) и прослеживается история пути луча в зональной расчетной области до его попадания на поверхностную зону. Далее проводится инверсия пути луча и вычисление интенсивности падающего излучения на единичную площадку  $dF$  по рекуррентным соотношениям. Для краткости записи указание на спектральные величины опущено, что предполагает дальнейшее интегрирование по спектру излучения в рамках моделей полос.

$$I_{n+1} = \left[ \left( I_n + \frac{E_j^{\text{пад}} R_j}{\pi} \right) \exp(-\Delta S_j) \right] + \frac{E_{\text{АЧТ}}}{\pi} [1 - \exp(-\Delta S_j)]; \quad (1)$$

начальное условие:

$$I_0 = \frac{k(\beta)}{\pi} [E_i^{\text{собр}} + E_i^{\text{пад}}(1 - \varepsilon_i)], \quad (2)$$

где  $\Delta S_j = (k_r - k_c)\Delta l$  – оптическая толщина газового слоя  $\Delta l$  в объемной зоне  $j$ ;  $k_r$ ,  $k_c$  – коэффициенты поглощения газа и частиц соответственно;  $\varepsilon_i$  – степень черноты поверхностной зоны;  $R_j$  – коэффициент рассеяния газозвеси;  $k$  – коэффициент неравномерности углового распределения излучения на поверхности;  $\beta$  – угол между нормалью к поверхности и направлением излучения;  $E_j^{\text{пад}} = Q_j^{\text{пад}} / F_j$  – плотность потока падающего излучения на поверхностную или объемную зону  $j$ ;

$$Q_j^{\text{пад}} = \begin{cases} \sum_i E_i^{\text{собр}}(T_i) A V_i \Psi_{i,j}, & i - \text{объемная зона;} \\ \sum_i E_i^{\text{собр}}(T_i) F_i \varepsilon_i \Psi_{i,j}, & i - \text{поверхностная зона;} \end{cases} \quad (3)$$

$\Psi_{i,j}$  – среднезональные разрешающие угловые коэффициенты излучения с зоны  $i$  на зону  $j$ , учитывающие отражение и рассеяние излучения.

Суммирование по направлениям (телесным углам  $\Delta\omega$ ) интенсивности излучения дает локальное значение плотности падающего лучистого теплового потока в узле  $M$  единичной площадки  $dF$ :

$$E_M^{\text{пад}} = \sum_{\omega} I_{\omega,\beta} \sin \beta \Delta\omega. \quad (4)$$

Метод обладает большой эффективностью и универсальностью и может применяться в многозональных системах со сложными индикатрисами излучения граничных поверхностей.

**О.Ю. Кулешов, В.М. Седёлкин**

Технологический институт Саратовского государственного  
технического университета (г. Энгельс)

## **ДВУХФАЗНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛО-ВЛАГОПЕРЕНОСА В ВЫПЕКАЕМОМ ТЕСТОВОМ ИЗДЕЛИИ**

Выпечка хлеба и других мучных изделий – это процесс глубокого качественного изменения исходной тестовой заготовки за счет физических, биохимических и микробиологических процессов, протекающих при посредстве термовлажностной обработки. Поэтому определяющими процессами при выпечке являются физические процессы тепло-влажностного переноса. В первом периоде выпечки выпекаемая тестовая заготовка (ВТЗ) обрабатывается водяным паром, при конденсации которого на поверхности ВТЗ происходит прогрев и увлажнение заготовки. В последующих периодах выпечки (втором и третьем) происходит испарение влаги с поверхности и из глубинных слоев ВТЗ и их дальнейший прогрев. Происходит формирование мякиша и корки хлеба, сопровождающееся изменением формы и структуры изделия. Хлеб считается готовым, когда его центральная часть достигает температуры 97–98 °С.

Анализ процессов, происходящих внутри ВТЗ и на ее поверхности показывает, что математическое описание процесса выпечки может быть дано в виде краевой задачи тепловлажностного переноса при наличии фазовых превращений, изменении свойств и геометрии системы. Наиболее полный учет физических процессов при выпечке дает двухфазная модель процессов переноса – в твердой фазе (скелет хлеба) и в газовой фазе (порах хлеба). При этом предполагается, что 1) в твердой фазе происходит преимущественный перенос жидкой влаги за счет массопроводности; 2) в газовой фазе осуществляется преимущественный перенос пара за счет фильтрации; 3) внутренняя газовая среда ВТЗ представляет собой водяной пар и его состояние может быть описано уравнением состояния идеального газа.

Центральная часть ВТЗ обладает большой термической инерционностью в связи с наличием углубляющейся зоны испарения в мякише. Поэтому процесс выпечки можно проанализировать как одномерную задачу или совокупность одномерных задач тепловлажностного переноса (вдоль вертикального и горизонтального направлений, проходящих через центральную часть

ВТЗ). Для примера, приведем постановку краевой задачи вдоль вертикальной оси  $X$ :

1) уравнение переноса теплоты в твердой фазе (скелете хлеба)

$$(1 - \varepsilon)[(1 - u)\rho_0 c_0 + u_2 \rho_2 c_2] \frac{\partial t_{0,2}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial X} \left( \lambda_{0,2} \frac{\partial t_{0,2}}{\partial X} \right) + j_2 c_2 t_{0,2} + \alpha_{\text{конв}}(t_1 - t_{0,2})\gamma\rho + Q_{\text{фаз}}(1 - \varepsilon); \quad (1)$$

2) уравнение переноса жидкой влаги в твердой фазе (скелете хлеба)

$$(1 - \varepsilon) \frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial X} \left( a_2 \frac{\partial u}{\partial X} \right) + \Delta M_{\text{фаз}} \frac{(1 - \varepsilon)}{\rho_{0,2}}; \quad (2)$$

3) уравнение переноса теплоты в газовой фазе (порах хлеба)

$$\varepsilon \rho_1 c_1 \frac{\partial t_1}{\partial \tau} = j_1 c_1 t_1 + \alpha_{\text{конв}}(t_1 - t_{0,2})\gamma\rho + Q_{\text{фаз}}\varepsilon; \quad (3)$$

4) уравнение фильтрации пара в газовой фазе (порах хлеба)

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = \Gamma \frac{\partial^2 P}{\partial X^2} + \Delta P_{\text{фаз}}; \quad P = \rho_1 R T_1; \quad \Delta P_{\text{фаз}} = \Delta M_{\text{фаз}} R T_1 \varepsilon \rho_{1,2}. \quad (4)$$

Расчетная область задачи:

$$\Lambda_{x,\tau} = \{0 < X < 1; 0 < \tau < \tau_{\text{вып}}\}; \quad X = x/L; \quad L = f(\text{Fo}). \quad (5)$$

$$\text{Начальные условия: } \tau = 0: t = t_{\text{нач}}; w = w_{\text{нач}}. \quad (6)$$

$$\text{Граничные условия: } -\frac{\lambda}{L} \left( \frac{\partial t}{\partial X} \right)_w = q(x, \tau); \quad u_w = u_\Gamma(\varphi, t_w). \quad (7)$$

1-й период выпечки  $X = 1: q = q_{\text{конд}}; X = 0: q = q_\tau;$

2, 3-й периоды выпечки  $X = 1: q = q_{\text{конв}} + q_{\text{луч}}; X = 0: q = q_\tau;$

где  $a_2$  – теплопроводность материала скелета ВТЗ;  $c$  – теплоемкость, Дж/(кг · К); Fo – число Фурье;  $L$  – высота изделия, м;  $q_\tau$ ,  $q_{\text{конв}}$ ,  $q_{\text{луч}}$ ,  $q_{\text{конд}}$  – плотность теплового потока, обусловленная теплопроводностью, конвекцией, излучением и конденсацией пара на поверхности ВТЗ, Вт/м<sup>2</sup>;  $u$  – влажность материала, кг влаги / кг влажного материала;  $u_\Gamma$  – гидроскопическая влажность;  $X = x/L$  – безразмерная координата;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К);  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\tau$  – время, с;  $\tau_{\text{вып}}$  – время выпечки, с;  $\varphi$  – относительная влажность среды пекарной камеры;  $\varepsilon$  – пористость, м<sup>3</sup> пор / м<sup>3</sup> материала;  $\gamma$  – удельная поверхность, м<sup>2</sup> / кг;  $\alpha_{\text{конв}}$  – коэффициент внутрипоровой конвективной теплоотдачи;  $j$  – поток вещества, кг/с;  $\Delta M_{\text{фаз}}$  – источник массы вещества при фазовом переходе, кг/кг;  $Q_{\text{фаз}} = \Delta M_{\text{фаз}} r \rho_{1,2}$  – источник теплоты, Вт/м<sup>3</sup>;  $r$  – теплота парообразования.

Индексы: 0, 1, 2 – скелет тела, пар и жидкость соответственно; нач. – начальное значение;  $w$  – поверхность.

*А.С. Магомадов, Р.Г. Мальцев*

Кубанский государственный технологический университет (г. Краснодар)

## ПЛОТНОСТЬ ФРАКЦИЙ ГАЗОВЫХ КОНДЕНСАТОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ДАВЛЕНИЯХ

Оптимизация и интенсификация процессов добычи и переработки газовых конденсатов и их фракций требуют наличия их надежных теплофизических свойств в широком интервале параметров состояния. Важнейшими свойствами фракций газовых конденсатов являются – плотность и сжимаемость. Существующие методы прогнозирования указанных свойств дают погрешности, порой достигающие 5 % при атмосферном давлении и до 20 % при повышенных давлениях. В связи с отсутствием необходимой исходной информации (физико-химических и теплофизических свойств) эти методы принципиально не могут быть использованы для экспериментального и теоретического исследования. Развитие физики жидкого состояния требует дальнейшего накопления экспериментальных данных о теплофизических свойствах многокомпонентных углеводородных систем.

Для исследования плотности нами были отобраны фракции двух газовых конденсатов: Опошнянского и Солоховского месторождений. В таблице представлены экспериментальные значения плотности фракций Опошнянского и Солоховского газовых конденсатов.

Прежде всего, плотность фракций газовых конденсатов была тщательно изучена при атмосферном давлении. При этом использовались два метода определения плотности: пикнометрический и гидростатического взвешивания поплавка в изучаемой жидкости. Оба метода достаточно подробно описаны в [1]. Значения плотности при атмосферном давлении необходимы для расчета массы исследуемых жидкостей в области высоких давлений.

Для измерения плотности и сжимаемости фракций газовых конденсатов в области температур от –10 до +200 °С и дав-

лений от 0,098 до 60 МПа был выбран метод пьезометра переменного объема [2, 3]. При выборе метода исследования плотности и сжимаемости основным требованием было создание установки с минимальными коммуникациями и минимальным объемом нетермостатируемых полостей (так называемый «вредный объем»).

Таблица

| $t, ^\circ\text{C}$                  | Значения плотности $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> при давлениях $p$ , МПа |          |       |       |       |       |       |       |
|--------------------------------------|---|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                      | 0,098   | $P_{кр}$ | 9,8   | 19,6  | 29,4  | 39,2  | 49,0  | 58,8  |
| Опошнянское месторождение 122–150 °С |   |          |       |       |       |       |       |       |
| –8,6                                 | 816,4   | 818,1    | 821,8 | 826,8 | 831,6 | 836,1 | 840,5 | 844,8 |
| 39,4                                 | 776,8   | 779,1    | 783,7 | 790,2 | 796,1 | 801,8 | 807,3 | 812,8 |
| 88,2                                 | 736,4   | 739,3    | 745,4 | 753,5 | 761,1 | 768,1 | 774,9 | 781,7 |
| 135,7                                |   | 699,7    | 707,5 | 717,9 | 727,2 | 735,7 | 743,8 | 751,8 |
| 184,1                                |   | 657,3    | 667,7 | 680,9 | 692,1 | 701,9 | 711,2 | 720,4 |
| Солоховское месторождение 95–122 °С  |   |          |       |       |       |       |       |       |
| –8,9                                 | 785,6   | 787,4    | 790,6 | 795,2 | 799,6 | 803,7 | 807,8 | 811,7 |
| 38,6                                 | 746,0   | 748,4    | 752,4 | 758,3 | 763,9 | 769,1 | 774,2 | 779,2 |
| 87,5                                 | 704,8   | 707,9    | 713,1 | 720,8 | 727,9 | 734,5 | 740,8 | 746,9 |
| 134,7                                |   | 667,4    | 674,4 | 684,3 | 693,1 | 701,1 | 708,6 | 715,8 |
| 183,8                                |   | 622,9    | 632,3 | 645,1 | 655,9 | 665,3 | 673,8 | 681,9 |

Средняя относительная погрешность измерений плотности фракций газовых конденсатов в исследованных интервалах температуры и давления при доверительной вероятности 0,95 не превышала  $\pm 0,1\%$ . Перед началом опытов на установке были выполнены контрольные измерения на дистиллированной воде и н-гексане. Результаты измерений в пределах погрешности опытов согласуются со справочными данными [4].

#### Список литературы

- 1 Магомадов, А.С. Теплофизические свойства высоковязких нефтей : монография / А.С. Магомадов. – Краснодар : Изд-во КубГТУ, 2000. – 118 с.
- 2 Кириллин, В.А. Исследование термодинамических свойств веществ / В.А. Кириллин, А.Е. Шейндлин. – М. – Л. : Госэнергоиздат, 1963. – 550 с.
- 3 Магомадов, А.С. Экспериментальное исследование плотности газовых конденсатов при различных температурах и давлениях / А.С. Магомадов, Р.Г. Мальцев // Энерго- и ресурсосберегающие технологии и установки : материалы пятой Всерос. науч. конф. – Краснодар : КВВАУЛ, 2007. – С. 145–149.
- 4 Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик. – М. : Наука, 1972. – 720 с.

*Р.Г. Мальцев, А.С. Магомадов*

Кубанский государственный технологический  
университет (г. Краснодар)

### ОБОБЩЕННОЕ УРАВНЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ФРАКЦИЙ ГАЗОВЫХ КОНДЕНСАТОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ДАВЛЕНИЯХ

Для увеличения и усложнения процессов вторичной переработки газовых конденсатов требуются совершенствование технологий и точные данные о физико-химических свойствах газовых конденсатов и их фракций. Одними из важнейших свойств являются плотность и сжимаемость. Физика конденсированного состояния не позволяет в настоящее время надежно прогнозировать указанные свойства для таких сложных многокомпонентных углеводородных систем, какими являются газовые конденсаты и их фракции.

Для исследования плотности нами были отобраны фракции двух газовых конденсатов: Опошнянского и Солоховского месторождений. Физико-химические свойства их приведены в таблице.

Таблица

| Месторождение | Плотность $\rho_{20}$ , кг/м <sup>3</sup><br>при<br>$T=20\text{ }^\circ\text{C}$ | Средняя моляр-<br>ная масса $M$ ,<br>кг/моль | Показатель прелом-<br>ления $n$ при<br>$T=20\text{ }^\circ\text{C}$ | Групповой углеводородный состав, % массы |             |             |
|---------------|--|--|---|--|-------------|-------------|
|               |  |  |   | Ароматические                            | Нафте-новые | Парафиновые |
| Опошнянское   |  |  |   |  |             |             |
| 122 – 150     | 0,7925   | 0,1115                                       | 1,4490  | 32,0                                     | 29,7        | 38,3        |
| 150 – 175     | 0,8097   | 0,1328                                       | 1,4550  | 32,0                                     | 13,0        | 55,0        |
| 175 – 200     | 0,8320   | 0,1551                                       | 1,4650  | 32,0                                     | 9,7         | 58,3        |
| 200 – 225     | 0,8483   | 0,1860                                       | 1,4780  | 34,6                                     | 15,3        | 50,1        |
| 250 – 275     | 0,8624   | 0,2683                                       | 1,4895  | 31,4                                     | 11,9        | 56,7        |
| Солоховское   |  |  |   |  |             |             |
| 95 – 122      | 0,7612   | 0,0920                                       | 1,4270  | 32,0                                     | 29,7        | 38,3        |
| 150 – 175     | 0,7928   | 0,1378                                       | 1,4495  | 32,0                                     | 9,7         | 58,3        |
| 175 – 200     | 0,8057   | 0,1641                                       | 1,4562  | 34,6                                     | 15,3        | 50,1        |
| 200 – 225     | 0,8231   | 0,1939                                       | 1,4658  | 39,6                                     | 13,3        | 47,1        |
| 225 – 250     | 0,8363   | 0,2311                                       | 1,4750  | 31,4                                     | 11,9        | 56,7        |

Для обобщения полученных экспериментальных данных по плотности нами были использованы методы термодинамического подобия свойств веществ. При этом фракции рассматривались как однокомпонентные жидкие углеводороды, т.е. как некоторые гипотетические углеводороды со своими критическими параметрами состояния, которые вернее называть псевдокритическими параметрами состояния. Псевдокритические параметры состояния исследованных фракций газовых конденсатов рассчитывались с использованием физико-химических данных на основе методик, предложенных Л.П. Филипповым [1].

На основе экспериментальных данных было получено уравнение, описывающее плотность газовых конденсатов и их фракций при различных температурах и давлениях [2]:

$$f(\pi, \tau) = \frac{\rho(\pi, \tau)}{\rho(0, \tau)} = b_3(\tau) \cdot \pi^3 + b_2(\tau) \cdot \pi^2 + b_1(\tau) \cdot \pi + b_0(\tau),$$

где  $\rho(0, \tau)$  – значение плотности фракции газового конденсата при псевдокритическом давлении  $p_{кр}$ , которое находится в определенной зависимости от температуры;  $\rho(0, 0)$  – значение плотности фракции газового конденсата при псевдокритическом давлении  $p_{кр}$  и псевдокритической температуре  $T_{кр}$ ;  $\pi = p / p_{кр}$  – приведенное давление;  $\tau = T / T_{кр}$  – приведенная температура;  $b_i$  – безразмерные коэффициенты при  $\tau$  ( $i$  – целое число от 0 до 3);

$$b_0(\tau) = -0,054944506\tau^3 + 0,07196066\tau^2 - 0,04108214\tau + 1,006487513;$$

$$b_1(\tau) = 0,1099828\tau^3 - 0,143464823\tau^2 + 0,072078766\tau - 0,010982537;$$

$$b_2(\tau) = -0,00988973\tau^3 + 0,014560606\tau^2 - 0,0073617\tau + 0,001230383;$$

$$b_3(\tau) = 0,000252213\tau^3 - 0,00038257\tau^2 + 0,000198173\tau - 0,000034005;$$

Из полученных экспериментальных данных следует, что качественная зависимость плотности фракций газовых конденсатов от температуры и давления аналогична чистым углеводородам. Однако количественно эти зависимости отличаются от исследованных ранее плотностей чистых углеводородов в широком интервале параметров состояния [3].

#### Список литературы

- 1 Филиппов, Л.П. Подобие свойств веществ / Л.П. Филиппов. – М. : Изд-во МГУ, 1978. – С. 88.
- 2 Магомадов, А.С. Обобщенное уравнение плотности газовых конденсатов при различных параметрах состояния / А.С. Магомадов, Р.Г. Мальцев // Энерго- и ресурсосберегающие технологии и установки материалы пятой Всерос. науч. конф. – Краснодар : КВВАУЛ, 2007. – С. 149–153.
- 3 Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик. – М. : Наука, 1972. – 720 с.

## СНИЖЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОТИВОТОЧНЫХ ЦИКЛОНОВ

На сегодняшний день в науке и технике вопросы энерго- и ресурсосбережения являются приоритетными. Именно поэтому ученые и инженеры во всех отраслях промышленности предпринимают попытки совершенствования, оптимизации и модернизации действующего оборудования и технологий в данных направлениях. Проектирование процессов и аппаратов также ведется с учетом минимизации энергопотребления.

В промышленности широчайшее применение нашли циклоны различного типа, предназначенные для очистки газов от механических примесей.

Основными направлениями совершенствования циклонов являются:

- 1 Снижение гидравлического сопротивления.
- 2 Увеличение степени очистки.
- 3 Уменьшение габаритов.
- 4 Увеличение производительности.
- 5 Упрощение конструктивного оформления.

Энергозатраты на очистку газа в противоточном циклоне определяются затрачиваемой мощностью на продавливание газа:

$$N = \rho g Q \Delta H \text{ (Вт)}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность газовой смеси,  $\text{кг/м}^3$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\Delta H$  – потери напора, м;  $Q$  – объемный расход газовой смеси,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

$$\Delta H = \zeta V^2 / (2g) \text{ (м)}, \quad (2)$$

где  $\zeta$  – коэффициент гидравлического сопротивления;  $V$  – средняя скорость потока газовой смеси,  $\text{м/с}$ .

Подставляя выражение (2) в (1), получим:

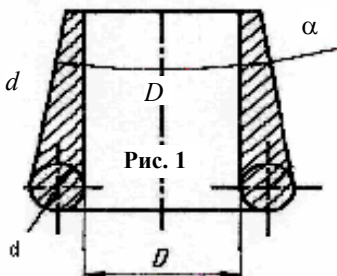
$$N = \xi g Q V^2 / 2 \text{ (Вт)}. \quad (3)$$

Анализ полученного выражения показывает, что снижение энергозатрат можно достичь путем снижения коэффициента гидравлического сопротивления.

Над этой задачей не безуспешно работают инженеры во всем мире. Так, например, инженер Тер-Линден [1] сумел уменьшить потерю давления на 20 – 25 % путем помещения спирали на входе в выходную трубу, тогда как Шиле [1], применив твердый центральный стержень в виде трубки Вентури с лопатками на входе выходной трубы, достиг эффективного уменьшения потери давления на 42 %.

Целью нашей работы является снижение гидравлического сопротивления противоточного циклона, увеличение степени очистки и упрощение его конструкции за счет использования специальной насадки, установленной на входе выходной трубы, которая способствует наиболее оптимальному движению очищаемого потока.

Предлагаемая нами конструкция специальной насадки (рис. 1) представляет собой деталь, образованную последовательно сопряженными между собой телами: тора, охарактеризованного диаметром окружности поперечного сечения  $d$ , и усеченного конуса с цилиндрической полостью диаметром  $D$ , характеризуемого углом конусности при вершине  $2\alpha$ .



Эксперимент осуществлялся на стенде, состоящем из: противоточного циклона; компрессора, обеспечивающего продавливание газа; ротаметра для определения объемного расхода газа, подаваемого во входной патрубком; дифманометра, которым определялись потери напора между входом во входной патрубком и выходом из выходной трубы противоточного циклона.

В лабораторных условиях были разработаны конструкции специальной насадки, а затем изготовлены из такого материала, как пластилин. Путем подбора эффективных соотношений размеров специальной насадки с размерами противоточного циклона проектировались типоразмеры специальных насадок, учитывая их конструктивную особенность.

На дальнейших этапах разработки специальные насадки были изготовлены из эпоксидной смолы с наполнителем, тем самым увеличивая точность данных, полученных в ходе

эксперимента.

Для эксперимента были разработаны и изготовлены насадки 4-х типоразмеров (см. табл. 1).



## 1 Типоразмеры насадок, устанавливаемых на входе выходной трубы

|   | $D$ , мм | $d$ , мм | $\alpha$ , ° |
|---|----------|----------|--------------|
| 1 | 30       | 2,5      | 11           |
| 2 | 30       | 3        | 11,5         |
| 3 | 30       | 4        | 13           |
| 4 | 30       | 5        | 14           |

На первом этапе было определено сопротивление модели циклона без насадки. Потеря напора без специальной насадки условно считается нулевой.

Следующий этап эксперимента был произведен с насадкой 1-го типоразмера. По показаниям дифманометра было зарегистрировано отсутствие снижения потери напора.

Следующий этап эксперимента производился с насадкой 2-го типоразмера. В результате, по показаниям дифманометра, было установлено снижение потери напора на 13 %.

С насадкой 3-го типоразмера было достигнуто снижение потери напора на 26 %.

По результатам работы с насадкой 4-го типоразмера было зарегистрировано увеличение потери напора на 2 % по сравнению с работой противоточного циклона без специальной насадки.

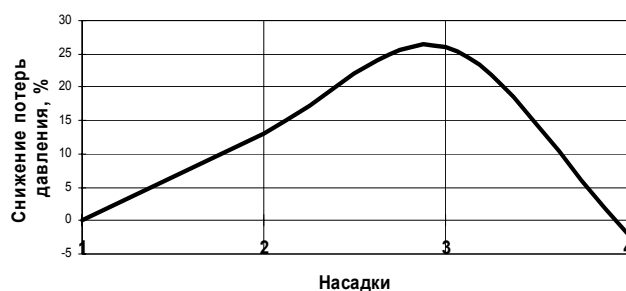


Рис. 2 Соотношение снижения потерь давления с типоразмерами насадок

В результате анализа проведенных экспериментов (рис. 2) были определены оптимальные зависимости размеров насадки от размеров противоточного циклона, при которых достигается максимальный эффект снижения гидравлического сопротивления.

Техническим результатом проведенных исследований в области совершенствования конструкции противоточного циклона явилась конструкция специальной насадки, установленной на входе выходной трубы, способствующая снижению гидравлического сопротивления за счет наиболее оптимального аэродинамического движения очищаемого потока.

Также нами предполагается, что будет наблюдаться увеличение степени очистки за счет использования данной насадки, так как исключаются местные завихрения в области перехода очищенного потока в выходную трубу, которые способствуют уносу уже отделенных механических примесей. На сегодняшний день нами ведется работа по экспериментальному исследованию противоточного циклона на предмет количественного и качественного увеличения степени очистки.

Конструкция разработанной специальной насадки очень проста, что вполне удовлетворяет требованию по упрощению совершенствуемых конструкций противоточных циклонов.

Внедрение специальных насадок в противоточные циклоны не требует больших капитальных затрат, а уже полученные экспериментальные данные дают основание утверждать о существенной экономической эффективности этого внедрения.

### Список литературы

- 1 Страус, В. Промышленная очистка газов / В. Страус. – М. : Химия, 1981. – С. 277.

*Г.И. Микита*

Российский университет дружбы народов (г. Москва)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ ВОЛНОВЫМ МЕТОДОМ

Температурный коэффициент линейного расширения важен в случаях, когда в одном изделии имеются детали из разных материалов.

Температурный коэффициент линейного расширения определялся на основе волнового метода (автор Микита Г.И. [1]) и анализа выражения для определения нормального модуля упругости динамическим методом в  $\frac{\text{мм}}{\text{мм}}^{\circ\text{C}}$  как /2:9/:

$$\alpha_{\text{ММ}} = \frac{\left[ \frac{4f_{0,i}^2 l_{0,20}^2 \gamma_{20}}{gE_{y,i}} \right]}{t - 20}, \quad (1)$$

где  $l_{0,20}$  – длина образца, м, при  $20^\circ\text{C}$ ;  $t - 21^\circ\text{C}$ ;

$$\gamma_{20} = \frac{m}{V}, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} - \quad (2)$$

плотность материала при  $20^\circ\text{C}$ ;  $m$  – масса материала, кг;  $V$  – объем,  $\text{м}^3$ ;  $E_{y,i}$  – модуль нормальной упругости при температуре контроля, МПа;  $f_{0,i}$  – резонансная частота при температуре контроля, Гц.

Для перехода в  $\frac{\text{м/м}}{^\circ\text{C}}$  или  $\frac{1}{^\circ\text{C}}$  необходимо:

$$\alpha = 0,01 \cdot \alpha_{\text{ММ}}, \frac{1}{^\circ\text{C}} \quad (3)$$

Модуль нормальной упругости определялся в волновом методе как:

$$E_y = 4\pi^2 l_{0,20}^2 \gamma_{20} \left| \frac{\sqrt{s}}{2} a_{0,u} e^{i\varphi_{0,u}} \left\{ \hat{g} \left( s \left[ \xi - \varphi'_{0,u} \right] + \varepsilon_{u,\xi} \right) \right\} \right|, \text{Па}, \quad (4)$$

где  $s$  – масштаб растяжения прямоугольника Гейзенберга;  $a_{0,u}$  – доминантная (по амплитуде) частота в вэйвлете при осевом ударном импульсе;  $\varphi_{0,u}$  – временное разрешение при осевом ударном импульсе;  $\hat{g}$  – преобразование Фурье атома Габора;  $\xi$  – частотный центр атома Габора;  $\varepsilon_{u,\xi}$  – корректирующий член при осевом ударном импульсе;  $\eta$  – центр положительного частотного интервала,

$$f_{0,i} = \left| \frac{\sqrt{s}}{2} a_{0,u} e^{i\varphi_{0,u}} \left\{ \hat{g} \left( s \left[ \xi - \varphi'_{0,u} \right] + \varepsilon_{u,\xi} \right) \right\} \right|.$$

Были проведены исследования температурного коэффициента линейного расширения при комнатной температуре для стали ВСТ2сп, приведенные в табл. 1.

### 1 Результаты исследований температурного коэффициента линейного расширения для стали ВСТ2сп

| Материал | Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha, \frac{1}{^\circ\text{C}}$ |
|----------|---|
| Сталь 3  | $14,7 \cdot 10^{-6}$  |

Выводы. Результаты исследований показали, что сталь 3 имеет совпадающее с нормированной зоной контроля значение температурного коэффициента линейного расширения. Быстродействие метода 8 минут, что отличает его от других методов.

#### Список литературы

- 1 Пат. РФ по заявке 2007103912/28(004212), Волновой метод контроля материалов / Микита Г.И. от 01.02.2007.
- 2 Марковец, М.П. Прочность металлов оборудования атомных электрических станций : учебное пособие / М.П. Марковец. – М. : МЭИ, 1979. – Ч. 1. – 94 с.
- 3 Сильман, Г.И. Материаловедение. Ч. 2. Металловедение и термическая обработка металлов / Г.И. Сильман. – Брянск : БГИТА, 2005. – 96 с.

## ТЕПЛО- И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОДЫ ВОДОХРОНИЛИЩА БАЙПАЗИНСКОЙ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Исследовались методические особенности контактной и бесконтактной кондуктометрии воды и водных растворов электролитов. С использованием четырех вариантов методов (два контактных и два бесконтактных) проводились параллельные измерения в растворах хлорида натрия разных концентраций (10, 20, 30, 40, 50, 60 г/л). При длительном наблюдении было выявлено, что помимо случайных и систематических погрешностей на результаты измерений может оказывать влияние действительное изменение электропроводности и теплофизические свойства (теплопроводность, плотность, изобарная удельная теплоемкость) раствора, периодически возникающее даже при постоянных внешних условиях. Изменения эти могут быть как незначительной величины, не превосходящей суммарного уровня погрешностей, так и достигать весьма значительных величин, на порядки превосходя обычные погрешности. В целом имеют место флуктуации электропроводности, имеющие широкий частотный спектр и широкий разброс по амплитуде. Механизм флуктуаций может быть связан со структурными перестройками в растворе. Сходство характера и амплитуды флуктуаций при параллельных измерениях в разных растворах свидетельствует в пользу того, что инициируются они внешними воздействиями, в качестве которых могут выступать физические поля.

Для решения проблемы теоретической оценки электропроводности растворов электролитов рассмотрим уравнение движения в форме

$$\mu \frac{dV}{dt} = ZeE - F_B. \quad (1)$$

Здесь сила внешнего электрического поля равна  $ZeE$ , где  $E$  – напряженность этого поля, а второе слагаемое является силой сопротивления среды. Для стационарного движения ионов с постоянной скоростью  $V = \text{const}$  имеет место  $ZeE = F_B$  [1], а это есть сила вязкости растворителя, которая дается в следующем виде [1]:

$$F_B = 6\pi\eta r_s V \left(1 + \frac{r_s}{r_D}\right). \quad (2)$$

Подвижность ионов можно выразить следующим образом:

$$b = \frac{Vf_m}{F_B},$$

где  $f_m = \exp\left(-\frac{mV^2}{2K_B T}\right)$  – функция максвелловского распределения по скоростям.

Согласно теореме Вириала о среднем

$$\bar{V} = V \frac{3}{2} \exp\left(-\frac{h\omega_L}{2K_B T}\right). \quad (3)$$

Взаимосвязь между эквивалентной электропроводностью  $\lambda$  и напряженностью внешнего электрического поля  $E$ , обеспечивающей движение зарядов в заданном направлении, дается в виде  $\lambda = F \frac{V}{E}$ , где  $F$  – число Фарадея. Правую часть данного уравнения умножим и разделим на величину элементарного заряда:  $\lambda = Fe(V/eE)$ , где  $eE$  – сила внешнего поля, но тогда  $V/eE$  – подвижность зарядов, являющаяся основным параметром диссипативных необратимых процессов систем зарядов. При этом  $eE = F_B$ .

Таким образом, уравнение для теоретических оценок электрических проводимостей растворов электролитов в рамках плазменно-гидродинамической модели состояния ионов в растворах электролитов принимает следующий вид [1]:

$$\lambda = \frac{eF \frac{3}{2} \exp\left(-\frac{h\omega}{2K_B T}\right)}{6\pi\eta r_s \left(1 + \frac{r_s}{r_D}\right) N_A \cdot 1,11 \cdot 10^{-12}}, \quad (4)$$

где  $F$  – число Фарадея;  $e$  – элементарный заряд;  $K_B$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура в К;  $\eta$  – вязкость растворителя;

$N_A$  – число Авогадро; потенциальная энергия взаимодействия ионов равна  $\hbar\omega$  [2];  $r_s$  – радиус сольватированного иона;  $r_D$  – дебаевский радиус экранирования [2].

В работе также измерена электропроводность (ЭП) водных растворов NaCl в диапазоне температур 20–60 °С. Электропроводность растворов измерялась в интервале частот 1–25 кГц с помощью цифрового автоматического моста переменного тока Р-5083.

Для всех растворов проводился анализ частотной составляющей измеренного сопротивления  $R$ . Искомое сопротивление раствора определялось экстраполяцией измеренного сопротивления к бесконечной частоте в координатах  $R-1/F$ . Погрешность определения удельной ЭП растворов не превышала 0,5 %.

Теплопроводность исследована методом регулярного теплового режима, плотность – методом гидростатического взвешивания, а теплоемкость – методом монотонного разогрева.

При измерении теплопроводности толщина исследуемого слоя в жидкой фазе составляла 0,55 мм. Перепад температуры на границе исследуемого слоя в жидком состоянии достигает 1,32–0,68 К. С повышением температуры теплопроводность и теплоемкость увеличиваются, а плотность уменьшается.

При обработке экспериментальных данных нами получен ряд уравнений для расчета тепло- и электропроводности, плотности и удельной изобарной теплоемкости исследуемых объектов.

При повышении концентрации удельная ЭП водных растворов NaCl проходит через минимум, положение которого практически не зависит от температуры. Максимальная при данной температуре удельная ЭП раствора  $\chi_{\max}$  была использована в качестве определяющего параметра для обобщения полученных зависимостей. Установлено, что во всем исследованном интервале концентраций и температур экспериментальные точки для приведенных величин удельной ЭП  $\chi/\chi_{\max}$  водных растворов NaCl укладываются на единые кривые. Рассматриваемые зависимости были обработаны методом наименьших квадратов с целью получения аналитических уравнений, описывающих зависимость приведенной ЭП  $\chi/\chi_{\max}$  от концентрации электролита  $C$ .

#### Список литературы

- 1 Ландау, Л.Д. Гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М. : Наука, 1986. – 736 с.
- 2 Теория расчета электрической проводимости многокомпонентных растворов электролитов / Б.Б. Танчанов, М.М. Балданов, Д.М. Балданова, В.И. Ермаков // Проблемы сольватации и комплексообразования в растворах : тез. докл. VIII междунар. конф. – Иваново, 2001. – С. 84.

*Ш.З. Нажмудинов<sup>1</sup>, Р.Ю. Подерни<sup>2</sup>, Н.У. Тагоева<sup>1</sup>,  
С.С. Бобиев<sup>1</sup>, М.М. Сафаров<sup>3</sup>*

1 – Национальный патентно-информационный центр (г. Душанбе),

2 – Московский горный институт,

3 – Таджикский технический университет им. М.С. Осими (г. Душанбе)

#### ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ ГОРНЫХ МАШИН В ШИРОКОМ ИНТЕРВАЛЕ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ

Наиболее полно эта проблема решается с применением систем автоматизированного проектирования (САПР), позволяющих сформировать, сравнить и оценить большое количество вариантов проектных решений. При этом в САПР технологических процессов, протекающих в потоках жидкостей при неизотермических условиях, широко используют математические модели процессов теплопереноса в виде краевых задач, параметрами которых являются эффективные теплофизические характеристики (ТФХ) (теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость и др.) потоков технологических жидкостей. Потоки реальных технологических жидкостей в большинстве случаев представляют собой дисперсные системы (суспензии, эмульсии или жидкостно-газовые смеси), эффективные значения ТФХ которых могут быть измерены только в процессе течения агрессивных жидких сред в широком интервале температур до давления 500 МПа.

Знание теплофизических свойств альтернативных рабочих жидкостей горных машин является важным условием их внедрения в промышленность. В настоящее время наибольший практический интерес представляют рабочие жидкости, содержащие некоторое количество гидразина. Имеющаяся в литературе информация об их термодинамических свойствах ограничена и подчас противоречива.

С использованием разработанных на кафедре теплотехники и теплотехнического оборудования Таджикского технического университета им. академика М.С. Осими методов прогнозирования давления насыщенных паров, плотности жидкости и пара, поверхностного натяжения и теплоты испарения, изотермической сжимаемости и изобарной теплоемкости выполнен термодинамический анализ имеющейся в литературе информации о теплофизических свойствах рассматриваемых рабочих жидкостей.

Надежностью теплотехнической системы является способность обеспечивать непрерывное и качественное теплоснабжение потребителей. Выработка тепловой энергии обуславливает в каждый момент нагрузку теплоэнергетической системы, включающую поставку всем потребителям собственно потребление и потери в теплосетях. Ряд факторов приводят к тому, что для покрытия нагрузки системы можно использовать не всю ее установленную мощность, а только рабочую мощность, причем эти факторы возможно разделить на имеющие детерминированный и стохастический характер. При оценке надежности теплотехнической системы исследуется, как правило, только способность системы к удовлетворению требований потре-

бителей, т.е. балансовая надежность теплотехнической системы, зависящая от взаимосвязи переменной нагрузки и рабочей мощности системы.

Использование вероятностных методов при оценке надежности и сравнении различных вариантов функционирования этих систем уточняет подготовку эксплуатационных режимов и является средством управления ими. При разработке методов оценки учитывается надежность теплотехнической системы с точки зрения реализации энергосберегающих технологий, уменьшения эксергетических потерь окружающей среды.

*М.Д. Пирмадов, М.М. Сафаров*

Таджикский технический университет им. М.С. Осими (г. Душанбе)

### ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ НА ИЗМЕНЕНИЕ ПЛОТНОСТИ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПОРОШКОВ

Проблема получения объемных (bulk) сверхмелкозернистых материалов тонкодисперсных порошков металлов, сплавов и соединений, предназначенных для различных областей техники, давно обсуждается в литературе. Объемные сверхмелкозернистые материалы можно получать непосредственно из объемных крупнозернистых и аморфных материалов или же методами порошковой технологии (включая компактирование (прессование) и спекание) из тонкодисперсных порошков. В последнее десятилетие интерес к методам получения сверхмелкозернистых объемных и дисперсных материалов существенно вырос. Как обнаружилось, в первую очередь, на металлах, уменьшение размера структурных элементов (частиц, кристаллитов, зерен) ниже некоторой пороговой величины может приводить к заметному изменению свойств [1]. Такие эффекты появляются, когда средний размер кристаллических зерен не превышает 100 нм и наиболее отчетливо наблюдаются, когда размер зерен менее 10 нм. Изучение свойств сверхмелкозернистых материалов требует учета не только их свойства и структуры, но и дисперсности. Поликристаллические сверхмелкозернистые материалы со средним размером зерен от 300 до 40 нм называют обычно субмикроструктурными, а со средним размером зерен менее 40 нм – нанокристаллическими. Результаты экспериментального измерения плотности субмикроструктурных порошков приведены в табл. 1. Термин «нано» происходит от греческого слова «нанос» (карлик) и соответствует одной миллиардной части единицы. Таким образом, нанотехнологии и науки о наноструктурах в наноматериалах имеют дело с объектами конденсированного вещества размером от 1 до 100 нм.

#### 1 Экспериментальные данные по измерению плотности и изменению влажности порошков от времени выдержки

**70,35 % Nb + 18 % Cr + 3,1 % B + 4,25 % Si + 3,5 % Fe + 0,8 % C**  
 $1 - d = 63 \text{ мкм}$

| Время выдержки, ч           | 1    | 3    | 5    | 22   | – |
|-----------------------------|------|------|------|------|---|
| $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>  | 3370 | 3271 | 3309 | 3391 | – |
| $\Delta m/m_0 \cdot 100 \%$ | 0,06 | 0,16 | 0,06 | 0,13 | – |

$2 - d = 100 \text{ мкм}$

| Время выдержки, ч           | 1    | 3    | 5    | 7    | 22   |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|
| $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>  | 3413 | 3396 | 3391 | 3371 | 3340 |
| $\Delta m/m_0 \cdot 100 \%$ | 0,09 | 0,04 | 0,10 | 0,01 | 0,05 |

$3 - d = 200 \text{ мкм}$

| Время выдержки, ч           | 1    | 3    | 5    | 7    | 22   |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|
| $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>  | 3250 | 3294 | 3234 | 3141 | 3142 |
| $\Delta m/m_0 \cdot 100 \%$ | 0,13 | 0,06 | 0,07 | 0,04 | 0,03 |

Термин «нанотехнология» впервые был использован профессором Нориео Танигучи в его докладе «Основные принципы нанотехнологии» (On the basic concept of nano-technology) на Международной конференции в Токио в 1974 году [2] и в последующих работах [3, 4].

В настоящее время электроника является основной отраслью промышленности, где нанотехнологии уже нашли реальное применение. Основной причиной изменения термодинамических характеристик нанокристаллов в сравнении с массивными веществами и является изменение вида и границ фононного спектра, т.е. изменение функции распределения частот атомных колебаний. Можно ожидать, что уменьшение размера частиц должно смещать фононный спектр в область высоких частот. Особенности колебательного спектра наночастиц в первую очередь будут отражаться на теплоемкости. Распреде-

ние собственных колебаний при наличии ограничений со стороны низких частот обсуждали авторы [5, 6]. Они предложили сходные выражения, описывающие число собственных колебаний  $n(\omega)$  прямоугольной частицы с учетом ее геометрических характеристик. Полученное в работе [6] выражение для  $n(\omega)$  в несколько модифицированном виде было применено в работе [7] для описания размерного эффекта на низкотемпературной теплоемкости. Теплоемкость – одно из наиболее изученных свойств наночастиц.

#### Список литературы

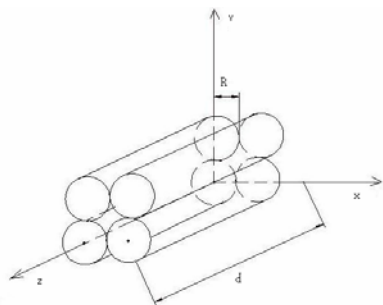
- 1 Гусев, А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А.И. Гусев. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 416 с.
- 2 Taniguchi, N. On the basic concept of nanotechnology / N. Taniguchi // Proc. Int. conf. Prog. Eng. Part 2. – Tokyo : Jap. Soc. Pres. Eng, 1974.
- 3 Taniguchi, N. Future trends of nanotechnology / N. Taniguchi // Intern. Japan soc. Precision engineering. – 1992. – V. 26. – No. 1. – P. 1–7.
- 4 Nanotechnology: Integrated Processing systems for ultra-precision and ultra-fine products. / Eds. N. Tanigiechi et. al. – Oxford : Oxford university Press, 1996. – 406 p.
- 5 Bolt, R.H. Frequency distribution of argentine in a three-dimensional continuum / R.H. Bolt // I. Acoust. Soc. Amer. – 1939. – V. 10, № 3. – P. 228–234.
- 6 Maa, D.-Y. Distribution of argentine in a rectangular chamber at low frequency range / D.-Y. Maa // I. Acoust. Soc. Amer. – 1939. – V. 10, № 3. – P. 235–238.
- 7 Mentrol, E.W. Size effect in low temperature heat capacities / E.W. Mentrol // I. Chem. Phys. – 1950. –V. 18, № 2. – P. 183–185.

**Ю.В. Савина, Е.М. Богатов**

Старооскольский технологический институт (филиал МИСиС)

### ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ИНВАРИАНТОВ ИЗЛУЧЕНИЯ В ПОЛОСТИ СЛОЖНОГО ВИДА С ЗАТЕНЕНИЕМ

Вычисление угловых коэффициентов излучения является неотъемлемой частью моделирования процесса радиационного теплообмена между телами, разделенными прозрачной средой (см. [1]).



**Рис. 1**

извольную точку  $M_0 \in \Omega_1$ . Тогда локальные угловые коэффициенты  $\varphi(M_0, \Omega_j)$  ( $j=2,3,4$ ) можно вычислить (см., например,

[2]), интегрируя формулу  $d\varphi(M_0, d\Omega_j) = \frac{\cos\beta_1 \cos\beta_2 d\Omega_j}{\pi r^2}$  по части поверхности  $\Omega_j$ , видимой из точки  $M_0$ . Здесь  $r$  – длина

линии, соединяющей центры площадок  $M_0$  и  $d\Omega_j$ ,  $\beta_1$  и  $\beta_2$  – углы, образованные единичными векторами нормалей к этим площадкам с данной линией. Связав величины  $\cos\beta_1$ ,  $\cos\beta_2$  и  $r$  с координатами и другими переменными, описывающими форму и взаимное расположение участвующих в теплообмене поверхностей и воспользовавшись формулой Стокса, преобразуем выражение для локального углового коэффициента к виду:

$$\varphi(M_0, \Omega_j) = n_1 \oint_{C_j} \frac{(z_j - z_0)dy_j - (y_j - y_0)dz_j}{2\pi r^2} + n_2 \oint_{C_j} \frac{(x_j - x_0)dz_j - (z_j - z_0)dx_j}{2\pi r^2} + n_3 \oint_{C_j} \frac{(y_j - y_0)dx_j - (x_j - x_0)dy_j}{2\pi r^2}, \quad (1)$$

Здесь  $M_0$  – координаты точки  $M_0$ ;  $(n_1, n_2, n_3)$  – локальные направляющие косинусы в данной точке поверхности ( $M_0$ );  $(x_j, y_j, z_j)$  – текущие координаты элемента поверхности  $(n_1, n_2, n_3)$ ;  $r$  – расстояние между элементами поверхно-

стей, вычисляемое по формуле  $r^2 = (x_j - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2 + (z_j - z_0)^2$ . Интегрирование проводится по криволинейному контуру  $(x_0, y_0, z_0)$ , ограничивающему поверхность  $\Omega_j$ . Заметим, что в формуле (1) координаты  $(x_0, y_0, z_0)$  и направляющие косинусы  $(n_1, n_2, n_3)$  не изменяются в процессе интегрирования. Эти постоянные величины определяют положение точки  $M_0$  и направление нормали в ней (см. [3]).

Вычислим, для примера,  $\varphi(M_0, \Omega_2)$ . Пусть  $d$  – длина цилиндров,  $R$  – их радиус. Тогда локальные направляющие косинусы в точке  $M_0$  поверхности  $\varpi_1$  равны  $\left(\frac{x_0}{R}; \frac{y_0}{R}; 0\right)$ , а контур  $C_2$ , охватывающий часть поверхности  $\Omega_2$ , видимую из точки  $M_0$ , представим в виде объединения дуг  $L_i$  ( $i=1, \dots, 4$ ) (см. рис. 2,  $j=2$ ), для которых:

$$L_1(L_3): \begin{cases} x_2 = a \ (x_2 = b), \ y_2 = \sqrt{R^2 - (a - 2R)^2}, \ 0 \leq z_2 \leq d, \\ dx_2 = 0, \ dy_2 = 0, \ dz_2 \neq 0; \end{cases}$$

$$L_2(L_4): \begin{cases} a \leq x_2 \leq b, \ y_2 = \sqrt{R^2 - (x_2 - 2R)^2}, \ z_2 = d \ (z_2 = 0), \\ dx_2 \neq 0, \ dy_2 = \frac{-(x_2 - 2R)dx_2}{\sqrt{R^2 - (x_2 - 2R)^2}}, \ dz_2 = 0. \end{cases}$$

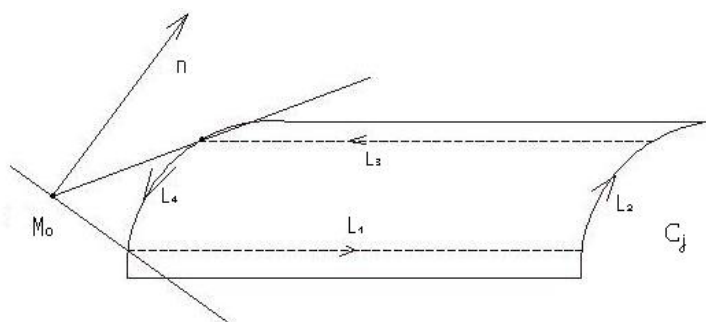


Рис. 2

Значения  $a$  и  $b$  могут быть найдены следующим образом. Проецируя систему цилиндров на плоскость  $XOY$  параллельно оси  $OZ$ , получаем систему окружностей  $\varpi'_n$  ( $n=1, \dots, 4$ ) радиуса  $R$  попарно касающихся друг друга (см. рис. 3). Через проекцию точки  $M_0$  проведем касательные к границам окружностей  $\varpi'_1$  и  $\varpi'_2$  и найдем абсциссы точек пересечения этих касательных с окружностью  $\varpi'_2$ :

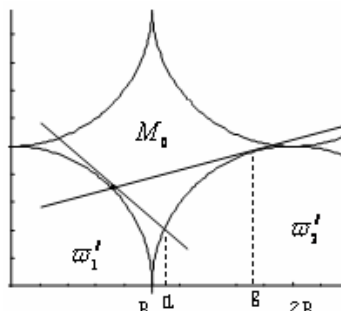


Рис. 3

$$a = \frac{1}{R} \left( -2x_0^2 + Rx_0 + 2R^2 - 2(R - x_0)\sqrt{x_0(x_0 + R)} \right);$$

$$b = \frac{1}{2(1+k^2)} \left( 4R + 2x_0k^2 - 2k\sqrt{R^2 - x_0^2} \right),$$

где  $k$  – угловой коэффициент касательной, проведенной через проекцию точки  $M_0$  к окружности  $\varpi'_2$ , равный

$$\frac{2R^2 - Rx_0 - 2\sqrt{(R^2 - x_0^2)R(R - x_0)}}{2(2R - x_0)\sqrt{R(R - x_0)} + R\sqrt{R^2 - x_0^2}}.$$

Используя формулу (1), получаем интегралы от одной переменной ( $z$  или  $x$ ), которые интегрируются в элементарных функциях с помощью стандартных методов.

В заключение отметим, что определение угловых коэффициентов излучения является актуальной задачей не только при решении задач радиационного теплообмена в классической постановке (см., например, [3]), но и для самых современных представлений об этом предмете (см. [4]).

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, проект № 06-08-96312.

#### Список литературы

- 2 Блох, А.Г. Теплообмен излучением : справочник / А.Г. Блох, Ю.А. Журавлев, Л.Н. Рыжков. – М. : Энергоатомиздат, 1991.
- 3 Спэрроу, Э.М. Теплообмен излучением / Э.М. Спэрроу, Р.Д. Сесс. – Л. : Энергия, 1971.
- 4 Дементьев, Ю.А. Распределение лучистой энергии точечного источника. Новая форма интегрального уравнения переноса излучения / Ю.А. Дементьев. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2005.

*К.А. Самиев, М.М. Сафаров, А.М. Сафаров, И.Н. Ганиев*

Таджикский технический университет им. М.С. Осими (г. Душанбе)

### ЛИНЕЙНЫЕ РАСШИРЕНИЕ И СЖИМАЕМОСТИ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ (Al + Be + PЗМ)

Современные тенденции в теплофизическом приборостроении наглядно проявляются в разработке специализированных АСНИ и ИВС, наделенных отказоустойчивостью и самонастраиваемостью. Это становится достижимым благодаря использованию микропроцессоров или встроенных микроЭВМ и дублированию отдельных, наименее надежных элементов системы.

Благодаря этой аппаратной и программной избыточности возникает множество состояний нормального функционирования, обеспечивающее более высокую надежность системы:

$$S = -P_i \ln \rho_i, \quad (1)$$

которая обладает свойством аддитивности и является одной из универсальных вероятностных характеристик. Улучшение потребительских качеств системы за счет самонастраиваемости или отказоустойчивости приводит к уменьшению величины  $S$ , и тот из вариантов, где эта  $S$  наименьшая, следует признать оптимальным. Отношение коэффициента теплового расширения  $\alpha_p$  к теплоемкости единицы объема  $C_{p\rho}$  среды, согласно формулы Томсона, равно величине  $\frac{1}{T} \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_S$ , где представляющий собой адиабатический термический коэффициент давления (АТКД)

блуждающий термический коэффициент давления (АТКД)

$$\beta_T = \frac{\alpha_p}{C_{p\rho}} = \frac{1}{T} \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_S, \quad \frac{1}{\text{Па}}. \quad (2)$$

В работе приводятся результаты измерения  $\beta_T$  (АТКД) жидкого алюминия в температурной области, в которой была замечена аномалия структурных свойств: при температуре около 933 К в экспериментах по рассеиванию нейтронов наблюдалось резкое изменение положения первого максимума структурного фактора. Для измерения АТКД жидких металлов авторами [1, 2] была использована новая методика измерения, в которой квазиадиабатические изменения давления в исследуемой среде производятся в периодическом режиме. Результаты нескольких серий измерений АТКД жидкого цезия представлены в сопоставлении с результатами аналогичных измерений [3]. Во всех сериях (полученных ранее [3] и в новых) присутствует неглубокий минимум на температурной зависимости АТКД в окрестности 550 К (цезий). Количественный анализ данных затруднен из-за недостаточной воспроизводимости абсолютных значений АТКД, хотя форма кривых и положения минимума повторяются. Результаты измерений дают дополнительное подтверждение корреляционной связи между аномалией на температурной зависимости структурного фактора жидкого цезия и алюминия и особенностями в поведении его термодинамических свойств; минимум АТКД, возможно, отражает наличие локального максимума у изобарной теплоемкости.

#### Список литературы

- 1 Зиновьев, В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах / В.Е. Зиновьев. – М. : Металлургия, 1989. – 384 с.
- 2 Благонравов, Л.А. Измерение отношения коэффициента теплового расширения  $\alpha_p$  к теплоемкости единицы объема  $C_{p\rho}$  жидкого цезия в области структурной аномалии / Л.А. Благонравов, С.М. Кузнецов, В.А. Алексеев // Вторая международная теплофизическая школа. 25–30 сентября 1995. – Тамбов, 1995. – С. 149.
- 3 The adiabatic thermal pressure coefficient of expanded alkali metals / V.A. Alekseev, L.A. Blagonravov, Feissal Modhen, I.V. Samorodskaya // J. Non crystalline Solids, 156–158 (1993). 659–662. North Holland.



1 – Технологический университет Таджикистана (г. Душанбе),

2 – Казанский государственный технический  
университет им. А.Н. Туполева,

3 – Таджикский технический университет им. М.С. Осими (г. Душанбе)

## МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТЕПЛОЕМКОСТИ УГЛЕВОДОРОДОВ И ИХ ПРОИЗВОДНЫХ, ОСНОВАННЫЕ НА МОДЕЛЬНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЯХ И МЕТОДАХ ПОДОБИЯ

Отсутствие законченной теории жидкого состояния не позволяет получить уравнения для расчета теплоемкости жидкостей в широкой области параметров состояния. Различные модельные представления позволяют дать лишь качественную оценку изохорной теплоемкости для простых жидкостей и описывают ограниченные интервалы изменения температур и давлений. Они неприменимы к таким ассоциированным соединениям, как спирты и кислоты. Анализ литературных данных по расчету теплоемкости показал, что наибольшее распространение получили два метода: аддитивных и соответственных составляющих. Аддитивные методы групповых составляющих и их модификации позволяют определять величину теплоемкости со средней погрешностью 2–5 %, однако несмотря на простоту, применимы только для атмосферного давления и имеют различные ограничения. Вторая группа методов расчета изобарной теплоемкости  $C_p$  основана на применении закона соответственных состояний в виде зависимости избыточной теплоемкости от приведенной температуры и критерия термодинамического подобия:

$$C_p - C_p^0 = f(\Phi, \tau), \quad (1)$$

где  $\tau$  – приведенная температура;  $\Phi$  – критерий термодинамического подобия (фактор ацентричности  $\omega$ , фактор термодинамического подобия  $A$  или число атомов углерода  $n$  в молекуле);  $C_p^0$  – идеально-газовая теплоемкость. Эти методы позволяют рассчитать  $C_p$  для предельных и других классов соединений при атмосферном давлении с точностью до 5 %, для ассоциированных жидкостей – жирных кислот указанные выше методы не пригодны. Погрешности расчета для них достигают 10 % и более. Многопараметрические уравнения Ли-Кеслера и Филиппова рекомендуются авторами для расчетов теплоемкости только предельных углеводородов и их смесей и имеют ограничения по параметрам и критериям подобия. Расчетная погрешность этих уравнений составляет  $\pm 5$  %.

Проведенный анализ существующих методов расчета  $C_p$  показывает, что в настоящее время мы не располагаем зависимостями изобарной теплоемкости в широком интервале изменения параметров. Ниже на основе полученных экспериментальных данных по  $C_p$  приведены обобщенные зависимости, рекомендованы уравнения, позволяющие рассчитать  $C_p$  при атмосферном и высоких давлениях.

Для расчета теплоемкости  $C_p$  углеводородов при атмосферном давлении рассмотрены уравнения Роулинсона – Бонди

$$\frac{C_p - C_p^0}{R} = 2,56 + 0,436(1 - \tau)^{-1} + \omega \left[ 2,91 + \frac{4,28(1 - \tau)^{1/3}}{\tau} + 0,296(1 - \tau)^{-1} \right] \quad (2)$$

и Филиппова

$$C_p - C_p^0 = 20 + 3,9 \frac{\tau^2}{1 - \tau} + \left( 74 - \frac{24,4}{\tau} + \frac{12,5}{\tau^2} \right) \cdot \lg \left( \frac{4}{A} \right). \quad (3)$$

Значения фактора ацентричности Питцера  $\omega$  – критической температуры  $T_{кр}$  – взяты из справочника, критерия Филиппова  $A$  рассчитаны на основании экспериментов. Сопоставление результатов расчета теплоемкости по уравнениям (2) и (3) с экспериментальными данными показывает, что они с погрешностью до 5 % совпадают между собой.

**Секция 2**

**НОВЫЕ МЕТОДЫ,  
ПРИБОРЫ И УСТАНОВКИ  
ДЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ**

*В.А. Вертоградский*

Российский государственный геологоразведочный  
университет (г. Москва)

### **КОМПЛЕКС МЕТОДОВ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ**

Представлено описание оригинальных методов, предназначенных для исследований теплофизических характеристик разнообразных конструкционных материалов. Методы были реализованы и использованы, главным образом, при разработке новых авиационных материалов. Большая часть методов реализована не только в единичном авторском исполнении, но и использована другими исследователями для измерений теплофизических характеристик более широкого круга материалов. В ряде случаев указаны направления возможного развития и совершенствования методов.

#### **Метод измерения теплопроводности проволочных образцов – через электрические параметры**

Метод предназначен для измерений теплопроводности электропроводных материалов (в основном, металлов и их сплавов) с монотонной зависимостью удельного электрического сопротивления от температуры. Сама эта зависимость в расчетной формуле не используется.

Образец разогревается в вакууме прямым пропусканием электрического тока. Соотношение длины образца и площади его поперечного сечения выбирается так, чтобы получить в центральной части образца изотермическую зону. За счет локального температурного возмущения вдоль образца формируется экспоненциальное распределение температур. Несколько последовательных уровней этого возмущения эквивалентно перемещению неизменного экспоненциального распределения вдоль образца. Параметры экспоненциального распределения регистрируются через изменение электрических сопротивлений участков образца, включенных в две частично совмещенные мостовые схемы. Таким образом, непосредственная регистрация распределения температур вдоль образца исключается.

Метод использован во Всероссийском институте авиационных материалов (ВИАМ) и в Грузинском политехническом институте, г. Тбилиси. Температурный интервал реализации 1200 ... 3000 К.

#### ***Метод измерения тепло- и электропроводности на х стержневых образцах***

Метод предназначен для исследований характеристик на образцах круглого или прямоугольного сечения с соотношением длины к диаметру (8 ... 10). Например, это могут быть цилиндры длиной 40 мм, диаметром 5 мм.

Используется сборка из двух состыкованных торцами образцов. Между торцами зажимается тонкий диск с высоким электрическим сопротивлением; при пропускании тока вдоль сборки этот диск является источником тепловыделения. Таким образом, принципиально исключаются тепловые потери по подводящим проводам к центральному нагревателю. Для расчета теплопроводности используются результаты измерений перепадов температур между образцом и его термостатирующей оболочкой в трех точках по длине образца.

Метод реализован в ВИАМе и в Китайском институте авиационных материалов, г. Пекин. Температурный интервал реализации 295 ... 1000 К.

#### ***Комплексные методы измерения теплопроводности, теплоемкости и температуропроводности листовых металлических материалов***

Это методы плоского бикалориметра при регулярном режиме 2-го рода при трех вариантах комбинации металлической пластины, зажатой в центре пакета из исследуемых образцов. Традиционное достоинство методов бикалориметра – исключение необходимости задавать и регистрировать симметричные тепловые потоки, подводимые к образцам.

Метод использовался в ВИАМе при паспортизации новых материалов и в Уфимском авиационном институте. Температурный интервал реализации 295 ... 600 К.

#### ***Релаксационный, релаксационно-динамический и несимметричный релаксационно-динамический методы измерения удельной теплоемкости***

Методы предназначены для массовых измерений теплоемкости, в основном, металлических материалов.

В релаксационном методе регистрируется переходная температурная кривая образца между двумя его стационарными состояниями. Переходный процесс возникает вследствие скачка вводимой в образец мощности.

Релаксационно-динамический метод является относительным. Используются исследуемый образец и образец сравне-

ния, идентичные по форме, с одинаковыми излучательными характеристиками поверхностей. Температура общего для образцов источника косвенного нагрева (например, системы инфракрасных ламп галоидного цикла) меняется ступенчато, с последующей изотермической выдержкой. Направление и величина этих ступеней выбирается так, чтобы последовательно достигались состояния равенства температур образцов.

В эти моменты тепловые потоки, подводимые к образцам, равны и отношение теплоемкостей образцов определяется только отношением скоростей изменения температуры.

В случае несимметричного релаксационно-динамического метода источник косвенного нагрева обеспечивает монотонное повышение температур исследуемого образца и образца сравнения. На образец с большей теплоемкостью задаются периодические дополнительные тепловые воздействия, обеспечивающие достижение им большей температуры по сравнению со вторым образцом. После прекращения дополнительных тепловых воздействий температурный ход этого образца является результатом суперпозиции линейного нагревания и релаксационных режимов охлаждения. Так обеспечивается появление состояний равенства температур образцов, при которых отношение их теплоемкостей определяется отношением скоростей изменений температур.

Методы реализованы в ВИАМе при температурах 293 ... 1400 К.

*Д.В. Волосников, П.В. Скрипов*

Институт теплофизики УрО РАН (г. Екатеринбург)

### **ИМПУЛЬСНЫЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ АВАРИЙНОГО СМЕШЕНИЯ ЖИДКИХ СРЕД**

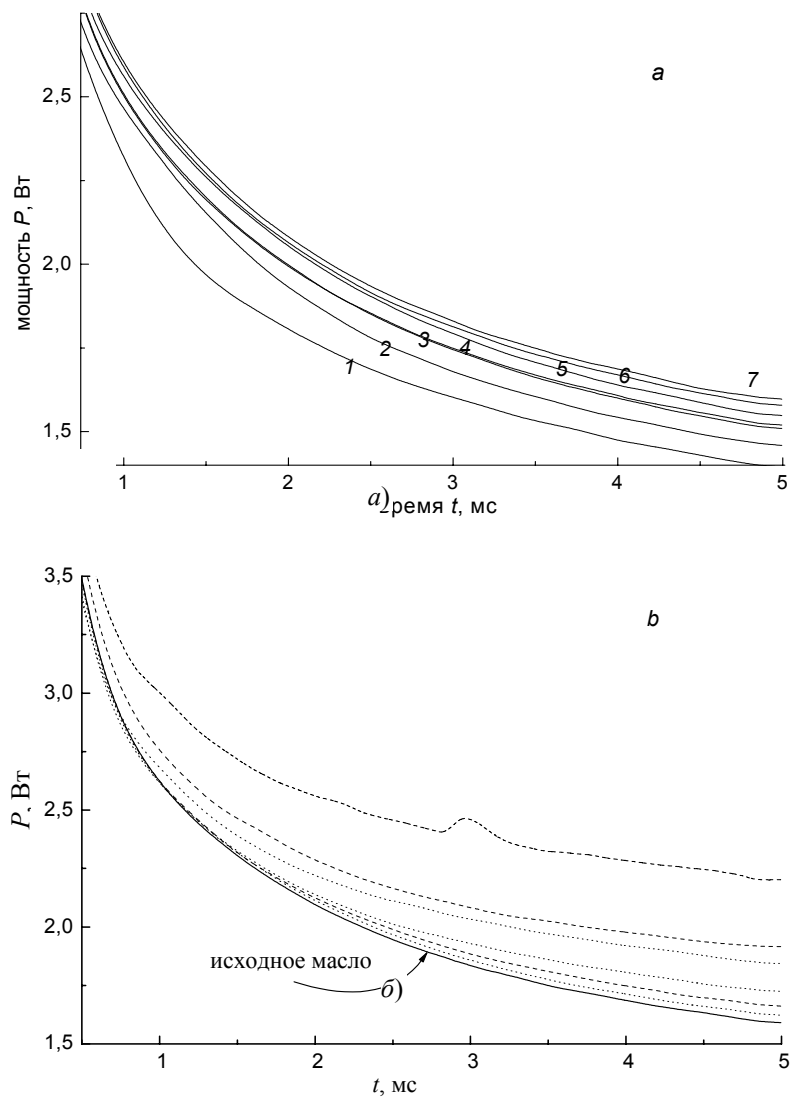
Продлить ресурс современного маслonaполненного оборудования возможно при использовании датчиков контроля состояния жидких сред. Основным негативным компонентом в жидких средах энергоемкого оборудования является летучая примесь. В трансформаторах или турбоагрегатах – это влага, в двигателях внутреннего сгорания – это бензин или тосол. Летучая примесь проникает в маслосистему через изношенные сальники или разрушенные уплотнения. Масло окисляется, ухудшаются его смазывающие и изолирующие свойства, снижается термоустойчивость. Даже наличие небольшого количества летучей примеси (доли процента) может привести к аварийной ситуации. Применение дорогостоящего лабораторного анализа или мобильных устройств косвенного контроля (например, измерение диэлектрических или оптических свойств) нередко является трудоемким или недостаточно информативным. Использование в качестве датчиков экспресс-контроля миниатюрных проволочных зондов, разогреваемых импульсами тока, позволяет не только идентифицировать вещества [1], но и контролировать текущее содержание примеси [2].

Целью данной работы является создание на базе теплофизического метода импульсного нагрева зонда в режиме температурного плато [1, 2] методики обнаружения аварийного смешения жидких сред. Данный режим удобен тем, что позволяет:

- измерять «мгновенные» характеристик теплообмена перегретых жидкостей при наличии температурной привязки;
- сопоставлять характеристики теплообмена жидких сред в области характерных значений рабочих температур и давлений;
- выработать практические рекомендации по применению методики импульсной тепловой диагностики свойств моторных масел для создания метода теплофизического контроля аварийного загрязнения моторного масла бензином или тосолом в двигателях внутреннего сгорания (ДВС).

Идея подхода заключается в измерении характеристик теплообмена зонда с веществом, кратковременно перегретым относительно температуры равновесного кипения или температуры терморазрушения. В работе применен режим быстрого нагрева зонда ( $t_{\text{hot}} = 0,1$  мс) до выбранной температуры  $T_{\text{st}}(t)$  и его последующей термостабилизации  $T_{\text{st}}(t - t_{\text{hot}}) \approx \text{const}$ . В опыте регистрировалось изменение электрической мощности  $P(t)$ , необходимой для поддержания постоянства температуры зонда во времени  $T_{\text{st}}(t - t_{\text{hot}})$ .

На рис. 1, а представлены графики изменения электрической мощности во времени  $P(t)$ , демонстрирующие возможности метода термостабилизации при сравнении характеристик теплообмена конкурирующих моторных масел. Повышение амплитуды сигнала  $P(t)$  соответствует интенсификации теплообмена.

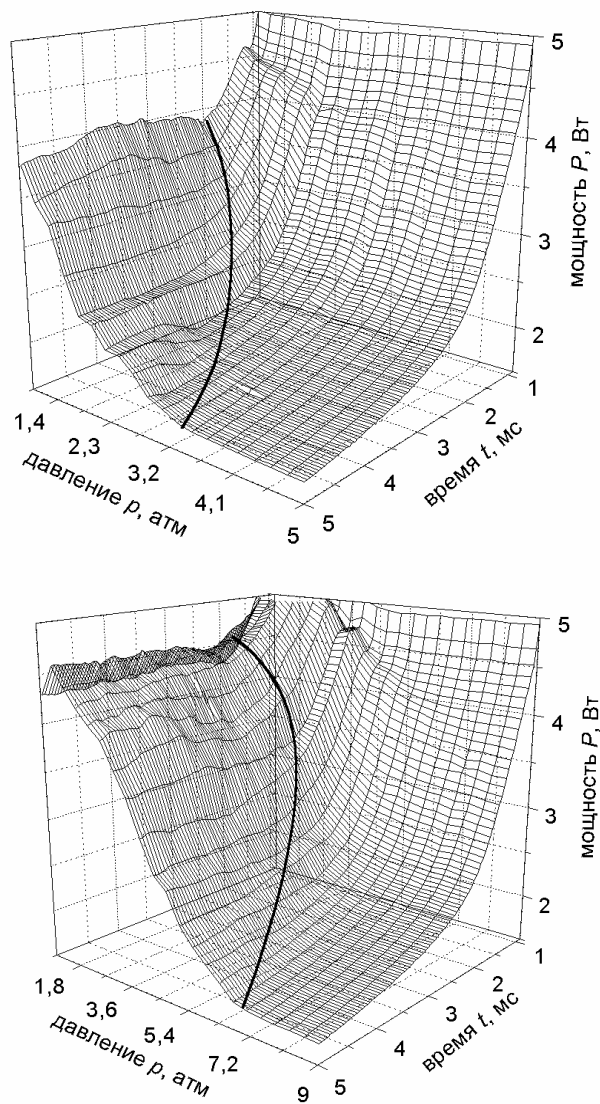


**Рис. 1** Изменение электрической мощности, необходимой для поддержания постоянства температуры зонда в импульсе  $T_{st} = 280$  °С, во времени для чистых масел (а):

1 – трансформаторное масло; 2 – турбинное масло Тп-22С; (моторные масла)  
 3 – shell helix 15w40; 4 – shell helix plus 10w40; 5 – total quartz 9000 5w40;

6 – shell helix ultra 5w40; 7 – texaco havoline 5w40 и для смесей (б) масла

shell helix ultra 5w40 с бензином АИ-92 (точки) и тосолом felix-40 (пунктир) при содержании примеси (снизу вверх от исходного масла) 1, 5, 9 %



**Рис. 2** Изменение электрической мощности, необходимой для поддержания температуры зонда  $T_{st} = 454\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в зависимости от времени и давления при импульсном нагреве зонда:

*a* – в синтетическом моторном масле total quartz 9000 5w40;

*b* – в растворе масла с 4 % бензина АИ-92.

Сплошная линия отделяет область кипения масла при заданном режиме его нагрева

Добавление в масло shell helix ultra 5w40 бензина или тосола сопровождается интенсификацией теплообмена, вплоть до вскипания. Момент вскипания отмечен возмущением монотонной функции нагрева во времени  $P(t)$  (рис. 1, *b*, верхняя кривая, 9 % тосола в масле). Обе исследованные добавки интенсифицировали теплообмен, причем добавки тосола оказались в два раза «эффективнее», чем добавки бензина. Таким образом, проводя измерения амплитуды сигнала  $P(t)$  относительно сигнала с исходного масла, можно построить тарифовочные графики и оценивать текущее состояние эксплуатируемого масла.

На рис. 2 представлены графики теплообмена зонда с чистым синтетическим моторным маслом shell helix ultra 5w40 (рис. 2, *a*) и с образцом того же масла с добавкой 4 % бензина (рис. 2, *b*) в зависимости от давления. Температура термостабилизации составляла  $T_{st} = 454\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Давление изменялось от импульса к импульсу. Показано, что изменение давления, создаваемое в маслосистеме двигателя, не будет препятствовать обнаружению летучих примесей.

Представленная методика может быть применена для диагностики состояния моторного масла ДВС. Дальнейшая работа будет направлена на анализ характеристик теплообмена в более широком круге масел, топлив и охлаждающих жидкостей.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ «Ведущие научные школы», проект НШ-4429.2006.8 и РФФИ, проект 07-08-96048\_урал.

#### Список литературы

- 1 Скрипов П.В., Старостин А.А., Волосников Д.В. ДАН. – 2003. – Т. 390, № 2. – С. 192–195.
- 2 Васильев С.Н., Волосников Д.В., Скрипов П.В. и др. ПГЭ. – 2004, № 4. – С. 130–135.

## УСТРОЙСТВО ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ КОМПЛЕКСА МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЕРДЫХ, СЫПУЧИХ И ЖИДКИХ МАТЕРИАЛОВ

Характеристики процессов теплопереноса, протекающих в конструктивных элементах энергетических установок, теплообменниках, машинах и аппаратах химической технологии, летательных аппаратах и др., во многом определяют эффективность функционирования объектов и их безопасность. Именно поэтому теплофизические свойства материалов и изделий (теплопроводность, теплоемкость, коэффициент температуропроводности и др.) должны учитываться при проектировании энергосберегающих технологий, математическом моделировании температурных полей в ограждающих конструкциях и потоках теплоносителей, оптимизации тепловых режимов процессов производства изделий из полимерных материалов. В то же время, в результате научно-технического прогресса, появляются новые материалы с неизвестными характеристиками, которые требуют создания новых методов и средств измерения, обеспечивающих более высокую точность измерения и позволяющих определять комплекс теплофизических характеристик материалов в широком температурном диапазоне.

Задачу повышения точности можно решить путем измерения одной и той же величины различными методами, при помощи одного и того же измерительного устройства.

Для поддержания заданных граничных условий в теплофизических приборах в настоящее время обычно используются жидкостные термостаты. Они требуют дополнительного оборудования (емкость с жидкостным теплоносителем, система регулирования температуры, система перекачки жидкости через измерительное устройство, соединительные трубки), которое по своим габаритам значительно превышает само измерительное устройство, и делает невозможным или весьма затруднительным проведение экспериментов при температурах ниже 0 °С, что не редко является необходимым условием при исследованиях.

Для решения этой проблемы было предложено использование элементов Пельтье, которые позволяют охлаждать всю измерительную систему до температуры, которая может быть на 50 °С ниже температуры окружающей среды. Кроме того, элементы Пельтье могут использоваться как в качестве нагревателей, так и в качестве охлаждающего оборудования и позволяют поддерживать граничные условия первого, второго и третьего рода.

Для реализации данного решения была разработана конструкция измерительного устройства (см. рис. 1) и автоматизированная система для управления ходом эксперимента.

Устройство состоит из нижнего 7 и верхнего 8 корпусов, находящихся между двумя блоками задания температурного режима, защитной пластины 6, сравнительных образцов 3 (пластина из полиметилметакрилата), электронагревателя 9, выполненного из константановой проволоки и намотанного по спирали Архимеда, термоэлектрических преобразователей 4 типа ТХК. Блоки задания температур состоят из элементов Пельтье 2, радиаторов и вентиляторов 1.

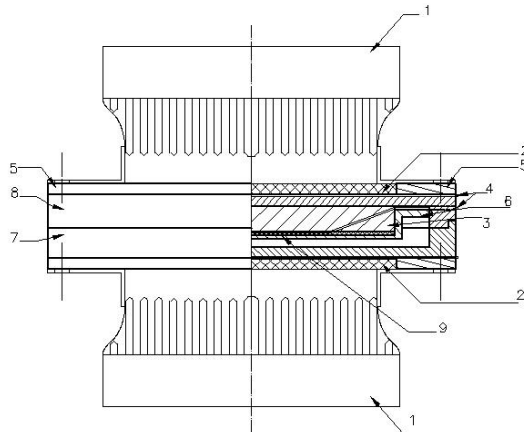


Рис. 1 Схема измерительного устройства

Данное измерительное устройство позволяет определять комплекс теплофизических величин стационарным методом, нестационарными методами регулярных режимов первого, второго и третьего рода и нестационарным методом с использованием временных интегральных характеристик температур на основе преобразования Лапласа. Измерительное устройство планируется использовать как в научных целях, так и в образовательном процессе при изучении студентами методов и средств измерения теплофизических величин.

**УСТАНОВКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ  
ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ.  
МЕТОД ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЛН**

Исследование температуропроводности в последние годы приобрело большое значение. Это связано с тем, что при высоких температурах измерение данной физической величины сопровождается гораздо меньшими погрешностями, чем измерение теплопроводности. В метрологическом плане при высоких температурах наиболее интересным представляется метод температурных волн.

Коэффициент температуропроводности (температуропроводность) по определению есть отношение коэффициента теплопроводности к теплоемкости единицы объема вещества. Таким образом, измерив температуропроводность, можно по известной теплоемкости рассчитать теплопроводность. Температуропроводность представляет и самостоятельную ценность, поскольку определяет темпы нестационарных тепловых процессов.

Основой практического применения метода температурных волн является работа Краева и Стельмах [1]. Они рассматривали бесконечную плоскую пластину, на первую поверхность которой воздействовал тепловой поток, амплитуда которого изменялась во времени по периодическому (гармоническому) закону с угловой частотой  $\omega$ . Ими было показано, что температуропроводность  $a$  плоской бесконечной пластины толщины  $L$  может быть рассчитана по формуле:  $a = \omega L^2 / z^2$ , где  $z$  – параметр, определяемый сдвигом фазы колебаний температуры второй поверхности образца по отношению к фазе колебаний теплового потока, воздействующего на первую поверхность образца-пластины.

В дальнейшем эта формула была уточнена для случаев, когда исследуемым образцом являлась не бесконечная пластина, а пластина конечных размеров [2].

Предложенная в работе [1] методика измерения оказалась технически достаточно проста и позволяла определять теплофизические параметры материалов при весьма высоких температурах (вплоть до температур плавления переходных металлов).

Данная методика была реализована в многочисленных экспериментальных установках, благодаря чему постепенно удалось изучить недостаточно проработанные моменты и постепенно создать прецизионный инструмент исследования теплофизических свойств веществ при высоких температурах.

В работе анализируются экспериментальные установки, созданные Краевым, Зиновьевым, Пелецким, Ивлиевым и другими исследователями. Показано, что погрешность измерений температуропроводности при исследовании методом температурных волн может быть доведена до 2 %.

Работа выполнена благодаря поддержке гранта РФФИ № 06-08-00088.

Список литературы

- 1 Краев, О.А. Температуропроводность и теплопроводность металлов при высоких температурах / О.А. Краев, А.А. Стельмах // Исследования при высоких температурах. – Новосибирск : Наука, 1966. – С. 55–74.
- 2 Мориллов, В.В. Теплоемкость гадолиния в окрестности температуры ГПУ-ОЦК-превращения. Измерение методом температурных волн / В.В. Мориллов, А.Д. Ивлиев // ТВТ. – 1995. – Т. 33, № 3. – С. 367–372.



С.А. Анучин, Г.Н. Серeda, П.А. Степанов

ФГУП Обнинское научно-производственное  
предприятие «Технология»

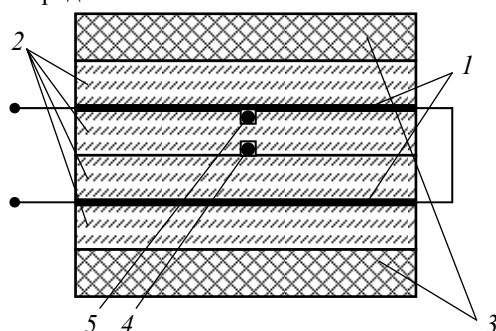
**МЕТОДИКА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
КЕРАМИЧЕСКИХ  
МАТЕРИАЛОВ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Для проектирования летательных аппаратов (ЛА) необходимо располагать данными о теплофизических свойствах (ТФС) материалов. Одним из самых теплонагруженных элементов ЛА является головная (носовая) часть. Неопределенность данных о ТФС материала может приводить к ошибке в проектировании носовой части ЛА, чреватой выходом за допустимые температурные пределы бортового оборудования. Оценки показывают, что погрешность значения коэффициента теплопроводности материала в 10 % приводит к изменению температуры внутренней поверхности ЛА до 50 К.

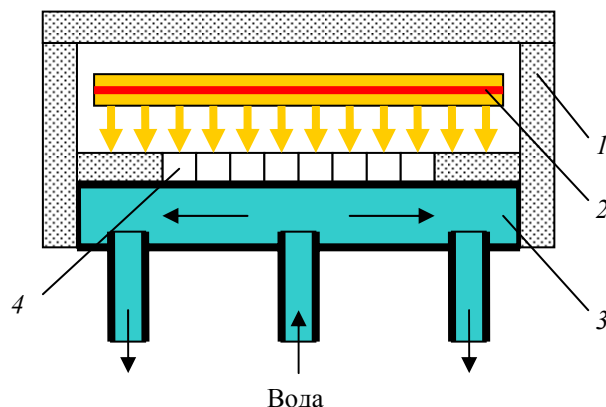
Известные методы и средства теплофизических исследований не обладают достаточной точностью и производительностью в диапазоне температур до 1500 К. Как правило, паспортизация материала по ТФС требует от 50 до 100 человеко-часов рабочего времени коллектива испытательного подразделения. Максимальный уровень экспериментальных температур колеблется от 800 до 1200 К. Имеющиеся справочные данные не полны, устарели и не содержат сведений о новых материалах, а их точность при высоких температурах не превышает 20 %.

В этой связи актуальным представляется расширение температурного диапазона, уменьшение погрешности определения ТФС керамических материалов с одновременным увеличением производительности. Совокупная разработка методов и средств автоматизации теплофизических исследований представляет собой важную научно-техническую задачу.

Целью экспериментально-теоретической работы являлось повышение точности определений ТФС перспективных керамических материалов аэрокосмического назначения на 5 – 10 % с одновременным повышением производительности в 3 – 5 раз и расширение диапазона экспериментальных температур до уровня 1500 К за счет внедрения новых методик, алгоритмов, программ, компьютерных и технических средств.



**Рис. 1** Схема измерительного узла по квазистационарным методам:  
1 – нагреватель; 2 – исследуемый материал; 3 – теплоизоляция;  
4, 5 – термопары.



**Рис. 2** Установка определения ТФС нестационарным методом:  
1 – теплоизоляция; 2 – галогенные лампы; 3 – холодильник;  
4 – экспериментальные образцы

Для определения ТФС керамических материалов в составе автоматизированного комплекса (АКО ТФСМ) реализованы три независимых метода исследований: квазистационарного теплового режима, импульсного теплового потока и нестационарного теплового режима (одностороннего лучистого нагрева). Метод квазистационарного теплового режима (КТР) предназначен для определения коэффициентов теплопроводности, температуропроводности и удельной теплоемкости керамиче-

ских материалов в интервале температур 300 – 1200 К. В основу метода положено решение линейной ОЗТ для квазистационарного теплового режима неограниченной составной пластины, при двустороннем нагреве постоянным тепловым потоком. Метод импульсного теплового потока (ИТП) предназначен для определения коэффициента теплопроводности, коэффициента температуропроводности и удельной теплоемкости твердых неэлектропроводных материалов в интервале температуры 300 – 800 К. В основу метода положено решение ОЗТ для бесконечной пластины, одна сторона которой теплоизолирована, а другая подвергается воздействию импульсного теплового потока (рис. 1).

Метод нестационарного теплового режима (НТР) предназначен для определения температурных зависимостей коэффициента теплопроводности керамических материалов в диапазоне температур от 300 до 1500 К. В экспериментальной установке осуществляется односторонний лучистый нагрев фронтальной поверхности образца исследуемого материала по заданному температурному режиму (рис. 2). Для определения температурных зависимостей коэффициента теплопроводности материала решается нестационарная нелинейная ОЗТ. При этом используется экстремальная постановка обратной задачи, которая предполагает поиск зависимостей ТФС, доставляющих минимум квадратичному функционалу невязки экспериментальных и расчетных температур в местах установки датчиков за все время эксперимента.

По методикам ИТП и КТР исследования проводятся на одних и тех же образцах размерами 70 × 70 × 10 мм. Далее из них изготавливаются образцы для методики НТР 7 × 7 × 60 мм.

Программа управления и аппаратно-техническое обеспечение АКО ТФСМ позволяют проводить исследования по этим методикам полностью в автоматическом режиме (в том числе настройка параметров эксперимента, задание тепловых режимов и определение ТФС материалов).

В состав программного обеспечения ПО АКО ТФСМ входят: основная программа сбора и управления «Recorder», OPC-сервер, обеспечивающий доступ к управлению комплексом программам-терминалам проведения испытаний (например, к управлению терморегуляторами), программы проведения теплофизических испытаний, программы решения ОЗТ для определения температурных зависимостей ТФС (рис. 3).

Проведена работа по поиску образцовых материалов с известными теплофизическими свойствами при высоких температурах, которые могут быть рекомендованы для проверки комплекса определения ТФС. В качестве таких материалов могут использоваться материалы, производимые в ОНПП «Технология»: НИАСИТ-8ПП и ТЗМК-10 (ТЗМ-23М).

В качестве иллюстрации на рис. 4 представлены температурные зависимости коэффициента теплопроводности для материалов на основе кварцевого стекла.

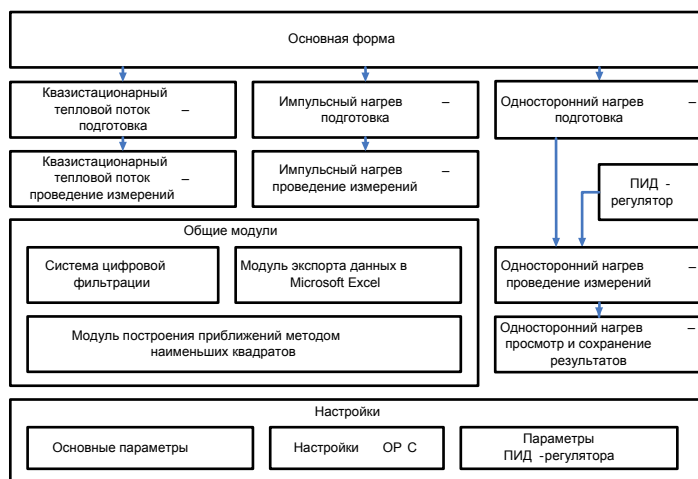
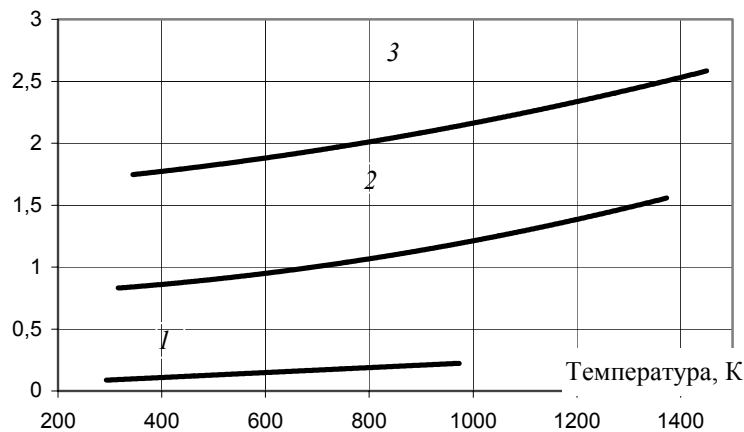


Рис. 3 Структура программного обеспечения комплекса АКО ТФСМ

В автоматизированном комплексе определения теплофизических свойств материалов реализованы преимущества использования современных программно-аппаратных средств и применения математического аппарата коэффициентных обратных задач теплопроводности.



**Рис. 4 Температурные зависимости коэффициента теплопроводности для:**  
 1 – волокнистого высокопористого материала ТЗМ-23М, плотность 370 кг/м<sup>3</sup>;  
 2 – кварцевой керамики НИАСИТ-8ПП, плотность 1960 кг/м<sup>3</sup>;  
 3 – стеклокерамики ОТМ-357, плотность 2480 кг/м<sup>3</sup>

Автоматизированный комплекс определения теплофизических свойств материалов позволяет проводить теплофизические исследования одновременно стационарными и нестационарными методами, что существенно повышает достоверность получаемых результатов.

*А.А. Балашов, Н.П. Жуков*

ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛА РЕАЛЬНОМУ ПРОЦЕССУ ПРИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОМ КОНТРОЛЕ

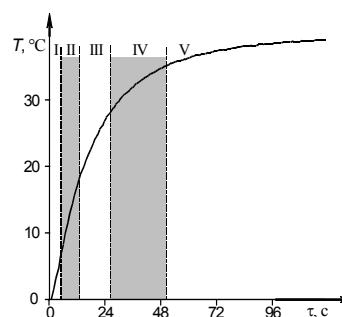
При решении задач контроля теплофизических свойств (ТФС) материалов определенный интерес представляют методы неразрушающего контроля (НК) с использованием круглого плоского нагревателя постоянной мощности. Это определяется тем, что ТФС материала находят на основании косвенных измерений и рассчитывают по определенным математическим моделям. В результате точность и надежность определения ТФС во многом обуславливается тем, насколько адекватно математическая модель описывает тепловые процессы, происходящие при измерении.

Разработанный метод входит в группу методов термического анализа, позволяет определять ТФС твердых материалов [1] и регистрировать температурно-временные характеристики структурных переходов в полимерных материалах [2] по изменениям тепловой активности с ростом температуры неразрушающим способом. Используется начальная стадия развития температурного поля при воздействии на исследуемое тело от плоского круглого источника тепла постоянной мощности.

Согласно измерительной схеме тепловое воздействие на исследуемое тело, имеющее равномерное начальное температурное распределение, осуществляется с помощью нагревателя постоянной мощности, выполненного в виде тонкого диска радиусом  $R$ , встроенного в подложку измерительного зонда. Начальное температурное распределение контролируется одновременно несколькими термоэлектрическими преобразователями (ТП), расположенными в центре нагревателя и на расстояниях  $r_i$  от центра. Центральным ТП в ходе эксперимента фиксируется термограмма – зависимость избыточной температуры  $T$  от времени (рис. 1).

На экспериментальной термограмме выделено пять участков. Участки II и IV – рабочие и характеризуются тем, что в соответствующие им интервалы времени тепловой процесс проходит стадии регуляризации, т.е. тепловые потоки, поступающие в исследуемое тело и подложку зонда, сохраняются практически постоянными [1, 2]. На переходных участках I, III, V тепловой поток изменяется во времени.

Разработаны методики определения границ рабочих участков с исполь-



**Рис. 1 Термограмма, зафиксированная в центре нагревателя на изделии из коксонаполненного фторопласта**

зованием статистических критериев [2].

Известные решения краевых задач нестационарной теплопроводности, описывающие процесс распространения тепла в твердых телах с различными ТФС [3] от плоского круглого нагревателя постоянной мощности, имеют сложный вид и мало-

пригодны для использования при реализации метода НК. Однако известно, что распределение температуры от плоского круглого источника тепла постоянной мощности радиуса  $R$  при малых значениях времени  $\tau$  близко к распределению температуры в плоском полупространстве. Поэтому для получения математической модели, описывающей процесс распространения тепла в исследуемой системе изделие – зонд на втором участке термограммы, измерительная схема с круглым нагревателем постоянной мощности заменена схемой с бесконечным плоским нагревателем. Это позволило получить простое расчетное соотношение, описывающее термограмму на втором участке [1, 2]:

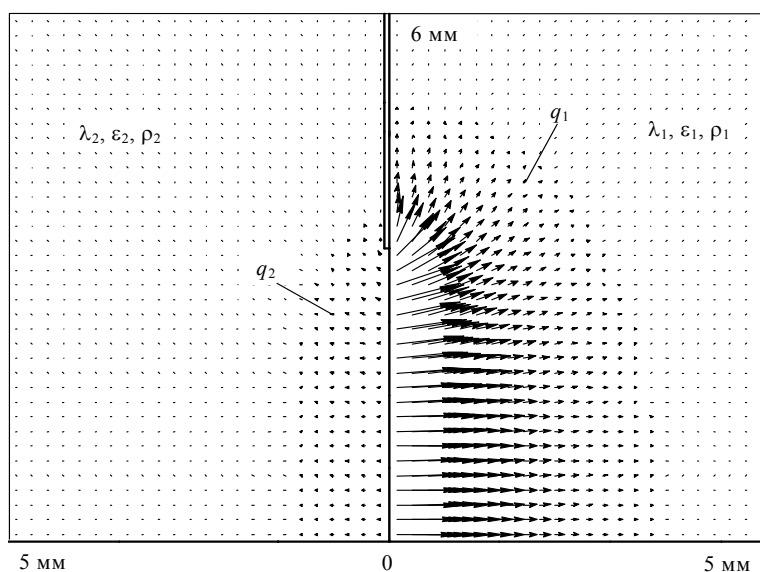
$$T_1(0, \tau) = \frac{2q\sqrt{\tau}}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)\sqrt{\pi}} - \frac{qc_n}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2},$$

где  $T_1$ ,  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  – избыточная температура, тепловые активности материалов исследуемого изделия и подложки зонда, соответственно;  $q$  – тепловой поток;  $\tau$  – время;  $c_n$  – теплоемкость единицы площади нагревателя.

Для четвертого участка термограммы расчетное соотношение приведено в работе [1].

Определение адекватности полученной математической модели реальному тепловому процессу, соответствующему распространению тепла от круглого плоского нагревателя конечных размеров, осуществляли с использованием численного моделирования температурных полей методом конечных элементов с помощью пакета ELCUT [4].

Визуализация поля плотностей тепловых потоков в системе двух полуограниченных тел при идеальной теплоизоляции между ними, полученная численным моделированием, представлена на рис. 2.



**Рис. 2** Поле плотностей тепловых потоков от плоского круглого нагревателя постоянной мощности

Вид распределения температуры от поверхностного круглого источника тепла постоянной мощности при регуляризации теплового процесса в локальной зоне исследуемого изделия может быть также отнесен к классу плоского полупространства [1].

Зависимость относительной погрешности температуры  $\delta_T = \frac{2(T_1 - T_2)}{T_1 + T_2} 100\%$  от времени  $\tau$ , обусловленной применением

различных математических моделей распределения тепла от ограниченного круглого и бесконечного плоского источников тепла, представлена на рис. 3. В плоскости контакта действуют: 1 – круглый источник тепла, расчеты выполнены с использованием пакета ELCUT; 2 – бесконечный плоский нагреватель, расчеты выполнены по зависимости (1). На рабочем участке термограммы относительная погрешность не превышает значения  $\delta_T = 3\%$  (рис. 3).

Анализируя зависимости, представленные на рис. 3, можно сделать вывод о том, что несовпадение значений температуры, полученных по модели распространения тепла от плоского круглого нагревателя и по модели распространения тепла от бесконечного плоского нагревателя постоянной мощности, минимально при равных значениях тепловой активности материалов подложки зонда и исследуемого изделия.

Таким образом, адекватность математической модели распространения тепла в плоском полупространстве реальному тепловому процессу позволила рекомендовать применение найденной зависимости на рабочем участке термограммы в методе НК ТФС и структурных переходов в полимерных материалах [1, 2].

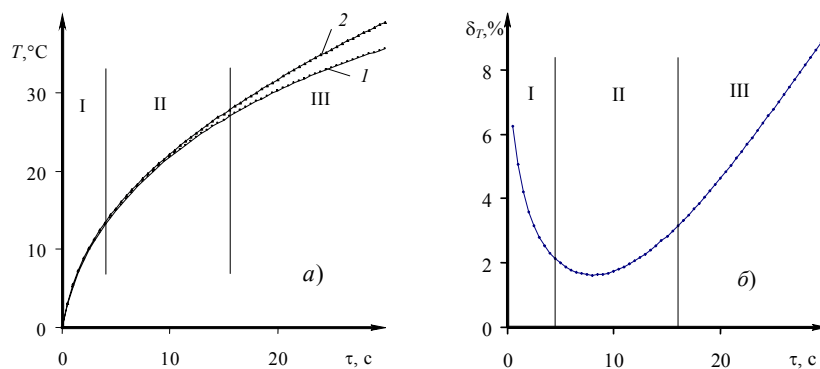


Рис. 3 Термограммы (а), построенные для системы двух полуограниченных тел и зависимость  $\delta_T = f(\tau)$  (б)

#### Список литературы

- 1 Пат. 2167412 РФ, МПК G 01 N 25/18. Способ комплексного определения теплофизических свойств материалов / Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова, Ю.Л. Муромцев, И.В. Рогов. – № 99103718/28 ; заявл. 22.02.99 ; опубл. 20.05.2001, Бюл. № 14.
- 2 Об одном методе исследования твердофазных переходов в полимерах / Н.Ф. Майникова, Ю.Л. Муромцев, Н.П. Жуков, А.А. Балашов // Пластические массы. – 2002. – № 6. – С. 23 – 26.
- 3 Козлов В.П. Двумерные осесимметричные нестационарные задачи теплопроводности / В.П. Козлов. – Минск : Наука и техника, 1986. – 392 с.
- 4 ELCUT: Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.1. Руководство пользователя. – СПб. : Производственный кооператив TOP, 2003. – 249 с.

*В.И. Горбатов, П.В. Скрипов, А.А. Смотрицкий*

Институт теплофизики УРО РАН (г. Екатеринбург)

### МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАСЕЛ В ПЕРЕГРЕТЫХ СОСТОЯНИЯХ

Наше исследование направлено на получение нового знания о теплофизических свойствах перегретых жидкостей, для которых существенное значение имеет фактор многокомпонентности. Объектами изучения служат масла теплоэнергетического оборудования с различными сроками и термическими условиями эксплуатации и их более простые аналоги. Методика опытов основана на моделировании в малом объеме функций тепловыделения, типичных для рабочих тел маслонеполненного оборудования, включая аварийные режимы. Речь идет о масштабе изменения температуры вещества в сотни градусов при входе в ключевые точки маслосистемы энергоблока.

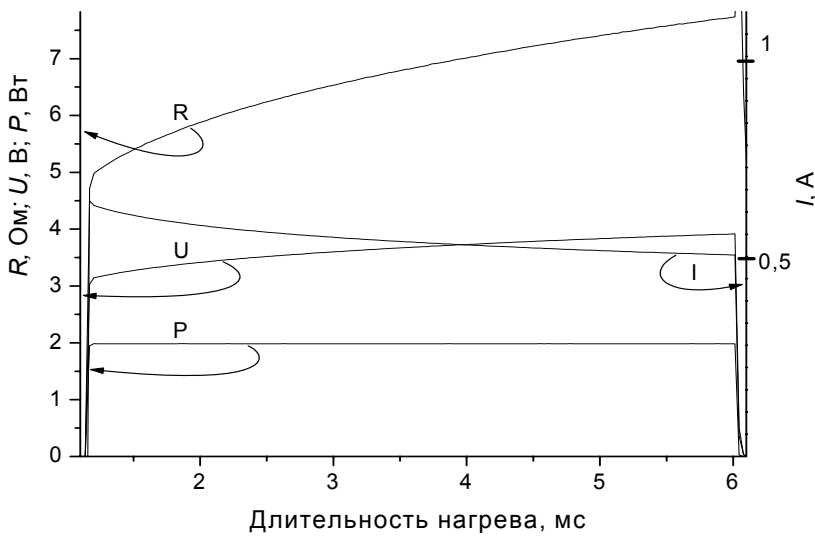
Обычно теплофизические свойства жидкостей определяют по параметрам отклика на малое температурное возмущение, вносимое в термостатированную среду. В процессах быстрого нагрева систем с существенной зависимостью растворимости компонентов от температуры (к которым относятся современные масла) теплофизические свойства начинают зависеть от характерных значений длительности и амплитуды воздействия, т.е. приобретают смысл эффективных величин. В подобной постановке задачи теплофизические свойства многокомпонентных жидкостей и, в частности, масел практически не изучены. Малоизученным остается вопрос о взаимосвязи изменения состава рабочего тела (вследствие его терморазрушения, обводнения, вымывания присадок и т.д.) с его термоустойчивостью и теплофизическими свойствами, особенно в условиях мощных нагрузок, характерных для ключевых точек маслосистемы.

Задача исследования состоит в разработке метода определения эффективных теплофизических свойств масел в широкой области изменения температуры, включая область перегретых (относительно температуры начала терморазрушения в квазистатическом процессе) состояний. Метод основан на импульсном эксперименте, согласованном с моделью теплообмена, и методике численного моделирования.

Для решения экспериментальной части задачи нами развивается метод управления мощностью импульсного нагрева зонда с учетом теплофизических свойств среды. Метод позволяет выбирать траекторию захода (в координатах время – температура) в область перегретых состояний вещества, согласованную с выбранной моделью теплообмена, выделять характерный сигнал о спонтанном вскипании на кривой нагрева и отслеживать динамику фазового перехода. По записанным данным об изменении мощности нагрева и температуры зонда во времени определяется плотность теплового потока от зонда через вещество – важная характеристика в опытах с импульсным нагревом.

В данной работе применена методика стабилизации мощности импульсного нагрева зонда – практически важный вариант функции нагрева. В качестве примера на рис. 1 представлено изменение напряжения  $U$ , тока  $I$ , мощности  $U \cdot I$ , а также сопротивления зонда  $R$  во времени.

**Рис. 1** Методика импульсного нагрева зонда в режиме постоянной мощности

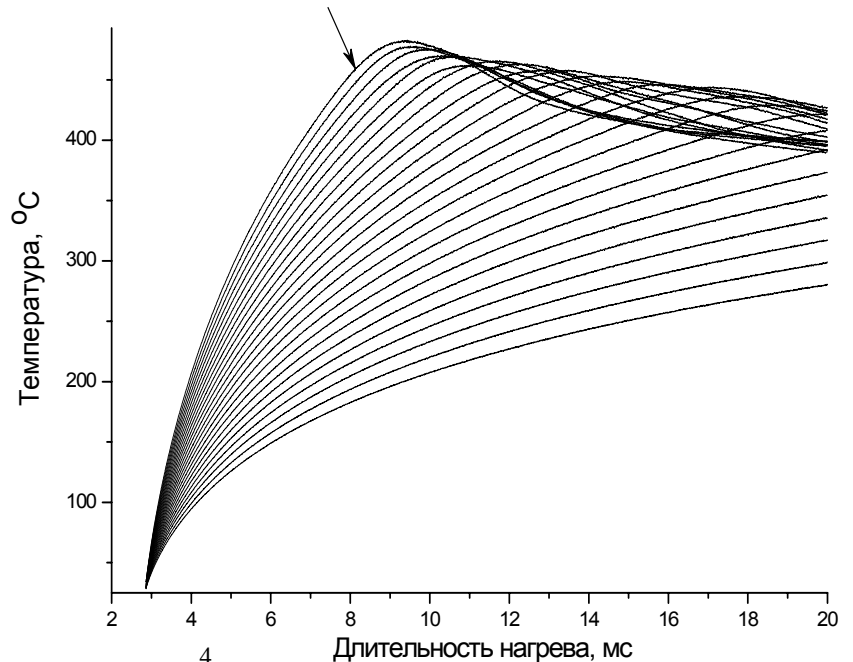


Опыты проведены при длительности разогрева зонда от 1 до 20 мс. Измерения проводились с постепенным увеличением перегрева вещества, вплоть до его спонтанного вскипания. На рис. 2 представлена зависимость температуры зонда в энергетическом масле МС-20 от времени в режиме постоянной мощности нагрева. Теплообмену при кипении масла отвечают участки кривых с остыванием зонда.

Исследование теплофизических свойств жидкостей на основе опытных данных проведено численным методом. Учтено наличие зависимости теплопроводности и объемной теплоемкости изучаемых веществ от температуры. Для определения теплофизических свойств перегретых масел мы развиваем интегроинтерполяционный метод.

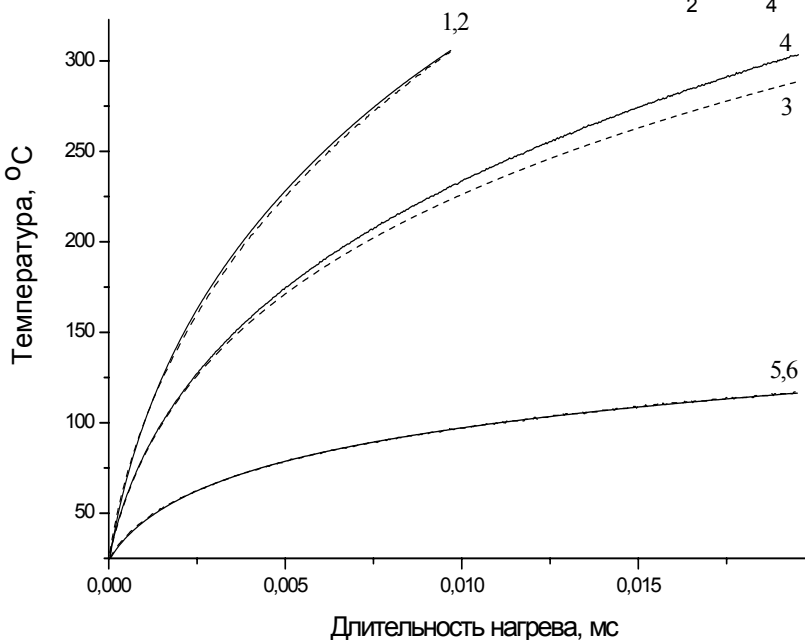
**Рис. 2** Изменение температуры зонда в масле МС-20 от времени при повышении мощности от 2,0 Вт (нижняя кривая) до 5,0 Вт (верхняя кривая) с шагом 0,13 Вт. Стрелкой отмечен момент вскипания масла

На рис. 3 приведен пример сопоставления зависимостей среднемассовой температуры зонда в режиме нагрева постоянной мощностью от времени, полученных в опыте и расчетным путем на основе справочных данных по свойствам материала зонда и исследуемого вещества, с учетом зависимости свойств от температуры.



**Рис. 3** Зависимости температуры зонда в тетрадекане от времени в режиме постоянной мощности, полученные в опыте (сплошные линии) и в расчете (пунктирные линии) при разных значениях мощности:

1 – расчет (мощность на зонде 4,9 Вт на интервале 10 мс);  
 2 – эксперимент (мощность на зонде 4,9 Вт на интервале 10 мс);  
 3 – расчет (мощность на зонде 3,6 Вт на интервале 20 мс);  
 4 – эксперимент (мощность на зонде 3,6 Вт на интервале 20 мс);  
 5 – расчет (мощность на зонде 1,4 Вт на интервале 20 мс);  
 6 – эксперимент (мощность на зонде 1,4 Вт на интервале 20 мс)



Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты 06-08-01324, 07-08-96048\_урал и гранта Президента РФ «Ведущие научные школы», проект

**ОПТИМАЛЬНАЯ ПО КВАДРАТИЧНОМУ КРИТЕРИЮ  
ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
МАТЕРИАЛОВ**

Задача неразрушающего контроля (дефектоскопии) материалов может быть решена с помощью оптимизации его теплофизических свойств [1]. Предлагается метод тепловой дефектоскопии с заданной точностью идентифицировать комплекс теплофизических свойств твердых материалов в реальном времени.

Сущность метода заключается в том, что в способе идентификации комплекса теплофизических свойств твердых материалов осуществляют тепловое импульсное воздействие от линейного источника нагрева на плоскую поверхность исследуемого и эталонного образцов, измеряют избыточную температуру на фиксированном расстоянии от линии нагрева.

Измерение температуры осуществляют в двух точках контроля:

- в первой точке контроля измеряют избыточную температуру от момента подачи теплового импульса до момента равенства избыточной температуры заданному минимальному значению  $T_{\min}$  и регистрируют моменты времени наступления максимального значения избыточной температуры и максимального значения скорости изменения избыточной температуры;
- во второй точке, расположенной на торце исследуемого образца, контролируют постоянство начальной температуры.

На основании дискретной математической модели прямой задачи теплопроводности искомые коэффициенты теплопроводности  $a$  и теплопроводности  $\lambda$  исследуемого материала находят в заданном диапазоне идентификации при расчете функционала невязки  $J$  как средневзвешенного наилучшего приближения значений избыточной температуры  $T(\tau)$  реального испытания к значениям избыточной температуры  $\hat{T}(\tau)$ , рассчитанной по дискретной математической модели для интервалов времени  $[0, \tau_1]$ ,  $(\tau_1, \tau_2]$  и  $(\tau_2, \tau_3]$  с весовыми коэффициентами  $p_1, p_2, p_3$  ( $p_1 \ll p_2 > p_3$ ).

Минимальному значению невязки ставят в соответствие значения теплопроводности и теплопроводности исследуемого материала и для расчета невязки используют формулу:

$$\{J(a, \lambda) = \sum_{i=1}^3 p_i \cdot \sum_{i=1}^3 \frac{p_i}{\tau_i - \tau_{i-1}} \cdot \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} [T(\tau) - \hat{T}(\tau, a, \lambda)]^2 d\tau + \gamma [\tau_{\max} - \hat{\tau}_{\max}]^2\} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $\tau$  – текущее время, отсчитываемое от момента подачи теплового импульса,  $\tau_0 = 0$ ;  $\tau_1$  – момент времени наступления максимального значения скорости изменения избыточной температуры;  $\tau_2 = 2\tau_{\max} - \tau_1$ ,  $\tau_{\max}$  – момент времени наступления максимального значения избыточной температуры;  $\tau_3$  – момент времени равенства избыточной температуры  $T_{\min}$ ;  $\hat{\tau}_{\max}$  – момент времени наступления максимального значения скорости изменения избыточной температуры;  $\gamma$  – параметр регуляризации.

Использование дополнительного слагаемого  $\gamma[\tau_{\max} - \hat{\tau}_{\max}]^2$  в формуле невязки позволяет достичь наилучшего приближения дискретной модели к экспериментальной термограмме, так как оно учитывает условие существования слабого экстремума [2].

На рис. 1 приведен результат идентификации теплофизических свойств пенополиуретана с минимально возможным значением невязки, где пунктирная кривая – график температуры, построенный математической моделью, непрерывная кривая – график температуры реального испытания с исключенной динамической погрешностью измерений, при этом  $T_{\min} = 18$  °С.

На интервале времени  $[0, \tau_1]$  значение невязки составило 4,470, на интервале  $(\tau_1, \tau_2]$  – 0,057 и на интервале  $(\tau_2, \tau_3]$  – 0,013. С учетом весовых коэффициентов  $p_1 = 0,01$ ,  $p_2 = 1$ ,  $p_3 = 0,5$ , на основании (1) значение невязки при идентификации теплофизических свойств пенополиуретана равно 0,109.

Идентифицированные значения ТФС пенополиуретана составили:  $a = 2,3108 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с и  $\lambda = 0,032$  Вт/(м · К), при этом эталонные значения исследуемого материала, полученные на экспериментальных стендах, включенных в Государственный реестр средств измерений для определения теплофизических характеристик теплозащитных материалов, равны  $a = 2,2 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с и  $\lambda = 0,031$  Вт/(м · К). Относительная погрешность идентификации составила 5,0 % и 3,2 % соответственно.

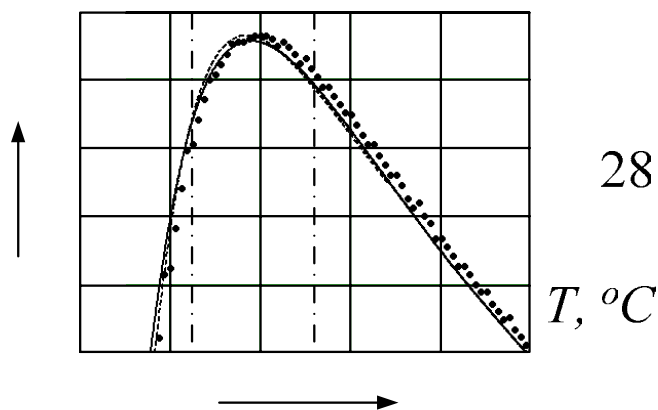


Рис. 1 Идентификация термограммы пенополиуретана 24

Для решения задач тепловой томографии необходимо заменить математическую модель с граничными условиями сопряжения на математическую модель нагрева тела тепловым излучением.

По изменению теплопроводности в исследуемом материале можно судить о наличии дефекта в материале (рис. 2). По-слойное представление структуры исследуемого материала производится путем идентификации его теплофизических свойств с применением разработанного метода.

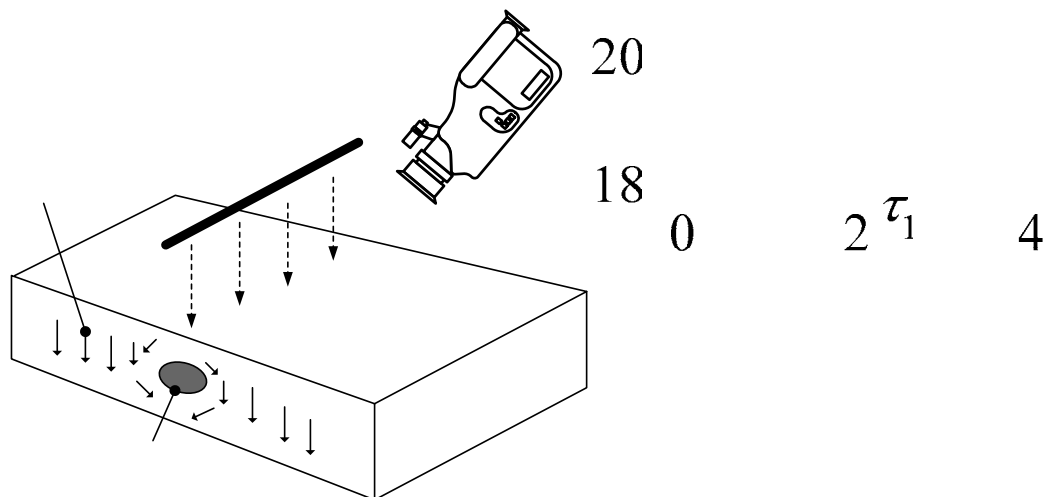


Рис. 2 Тепловой контроль и дефектоскопия материалов  
Список литературы

- 1 Коздоба, Л.А. Вычислительная теплофизика / Л.А. Коздоба. – Киев : Наукова думка, 1992.
- 2 Федоренко, Р.П. Приближенное решение задач оптимального управления / Р.П. Федоренко. – М. : Наука, 1978.

*О.А. Лонцаков, А.В. Пашанин, Ф.М. Гумеров*

Казанский государственный технологический университет

### УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ МАСЛОНАПОЛНЕННОГО ТРАНСФОРМАТОРА

С целью снижения энергетических потерь и повышения эффективности работы маслонаполненного трансформатора проведены экспериментальные исследования на его модернизированной тепловой модели с применением тепловых мостов.

На сегодняшний день накоплен большой опыт по модернизации систем охлаждения серийно выпускаемых трансформаторов. Следует отметить, что обычно при этом использовались традиционные способы интенсификации теплообмена в системах охлаждения:

- переход с естественной на вынужденную циркуляцию масла в баках;
- установка радиаторов или обдув баков вентиляторами.

Наряду с перечисленными выше методами перспективными являются следующие способы интенсификации теплообмена:

- использование для передачи тепла от обмоток и магнитопровода к стенкам бака тепловых мостов из материалов с теплопроводностью в 100–1000 раз больше теплопроводности масла;

**ВОЗМУЩЕНИЕ**

**ТЕПЛОВОГО ПОТОКА**

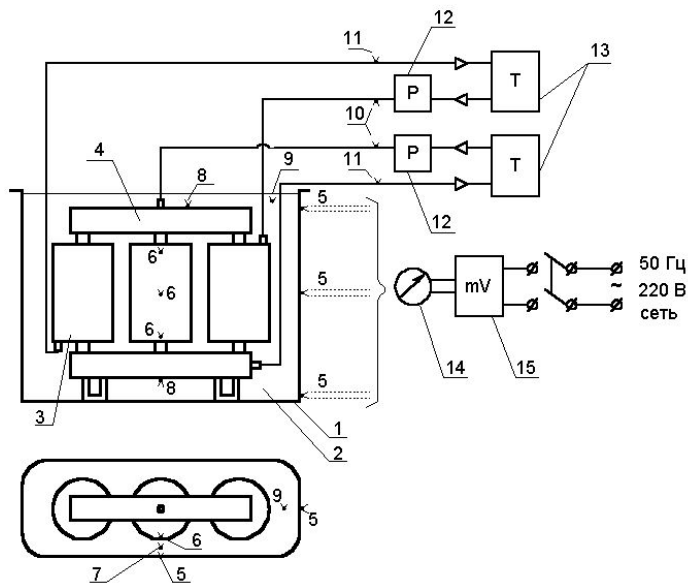
ИК ИЗЛ



- ультразвуковое возмущение пограничных слоев масла у поверхностей обмоток, магнитопровода, бака и уменьшение тепловых сопротивлений этих слоев.

Для экспериментального исследования процессов теплообмена и сопоставления их с результатами, полученными по математической модели, была сконструирована и изготовлена в натуральную величину тепловая модель промышленного маслonaполненного трансформатора ТМ-25/6, изображенная на рис. 1.

В результате проведения экспериментов было установлено, что разность температур масла в верхней и нижней точках трансформатора составляет 20–30 °С, т.е. нижняя треть бака трансформатора практически не участвует в отводе тепла от элементов активной части в окружающую среду. В этой ситуации наиболее целесообразными представляются исследования, направленные на более эффективный вклад в процессы теплоотдачи всего объема масла и всей поверхности бака.

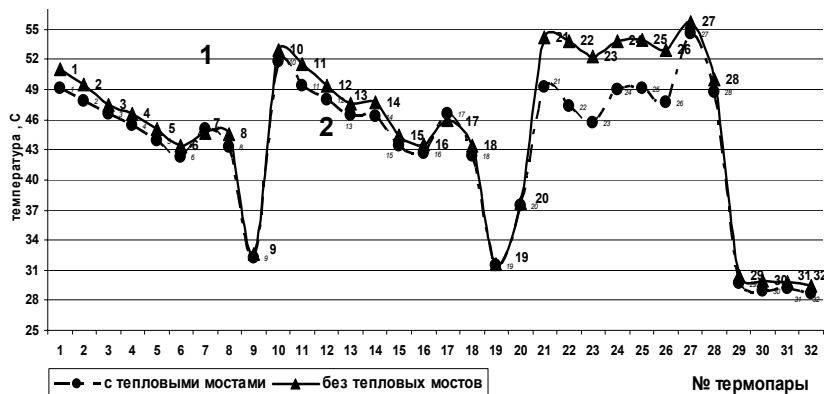


**Рис. 1** Установка для исследования теплообмена на модели промышленного маслonaполненного трансформатора:

1 – бак; 2 – трансформаторное масло; 3 – модель катушек трансформатора;  
4 – модель магнитопровода; 5–9 – термопары; 10, 11 – термопары на входе и выходе термостатирующей жидкости; 12 – расходомеры; 13 – термостаты; 14 – многопозиционный переключатель; 15 – милливольтметр

Были разработаны и изготовлены различные варианты тепловых мостов. Результаты испытаний этих моделей позволили выявить наиболее оптимальные конструкции и размеры, позволяющие обеспечить повышение интенсивности теплоотдачи от обмоток и магнитопровода к трансформаторному маслу (рис. 2 и 3).

Для решения поставленной задачи в среде интерактивного твердотельного моделирования PHOENICS был смоделирован процесс теплопередачи от активной части тепловой модели трансформатора (катушек, магнитопровода) к трансформаторному маслу. Процесс проводился для установившегося теплового режима в условиях, максимально приближенных к экспериментальным. Тепловые испытания трансформатора на математической модели имели целью определение полей температур в осевом и радиальном направлении – в обмотках, магнитопроводе, масле, стенках бака и сравнение их с величинами, полученными на физической модели. Разность температур масла в верхней и нижней частях трансформатора составляла около 20 °С. Наименьшая температура наблюдалась в нижних слоях масла, т.е. подтвердился вывод, полученный на экспериментальной модели, что нижняя часть бака работает неэффективно с точки зрения отвода тепла. Разница между экспериментальными значениями и данными, полученными в результате решения методом конечных объемов [2], не превышает 15–20 % (рис. 3).

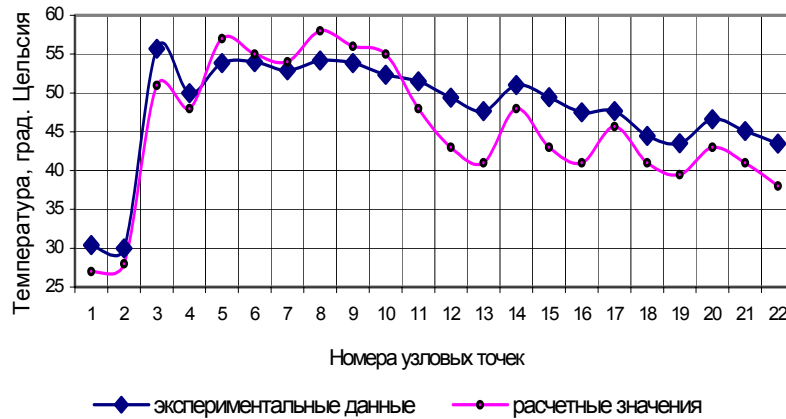


**Рис. 2** Опытные значения температур в контрольных точках системы:  
1 – без тепловых мостов; 2 – с тепловыми мостами

# 1 Технико-экономическая эффективность модернизации маслонаполненного трансформатора ТМ-25/6

| Маслонаполненный трансформатор | Мощность $N_{ном}$ , кВ·А | Удельный расход металла на обмотки, кг/кВ·А |       |
|--------------------------------|---------------------------|---|-------|
|                                |                           | меди  | стали |
| До модернизации                | 25                        | 1,085                                       | 3,25  |
| После модернизации             | 32,5                      | 0,759                                       | 2,27  |

Об эффективности модернизации маслаполненного трансформатора (на примере трансформатора ТМ-25/6) свидетельствуют и данные по удельному расходу металла (табл. 1).



**Рис. 3** Распределение температуры в узловых точках в баке трансформатора:

1–2 – дно бака; 3 – верхняя часть магнитопровода; 4 – нижняя часть магнитопровода; 5–7 – центральная часть катушки; 8–10 – боковая поверхность катушки; 11–13 – масло в центральной части; 14–16 – масло у боковой поверхности катушки; 17–19 – стенка бака в центральной части; 20–22 – боковая стенка бака

Подтверждение экспериментальных данных численными расчетами говорит о возможности использования пакета PHOENICS, представляющего собой комплекс для численного анализа гидродинамики и тепломассообмена на основе решения фундаментальных уравнений методом конечных объемов, и в дальнейших расчетах в силу достаточной точности и апробации работы.

Таким образом, полученные в настоящей работе результаты представляют практический интерес при модернизации и проектировании маслаполненных трансформаторов.

## Список литературы

- 1 Тарле, Г.Е. Ремонт и модернизация систем охлаждения силовых масляных трансформаторов / Г.Е. Тарле. – М. : Энергия, 1975.
- 2 Патанкар, С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар. – М. : Энергоатомиздат, 1984.
- 3 Тихомиров, П.М. Расчет трансформаторов / П.М. Тихомиров. –М. : Энергия, 1968.

Л.Л. Антонова, А.А. Чуриков

ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

**МЕТОДЫ И АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА  
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КОМПЛЕКСА  
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ**

Разработанные нами абсолютный и сравнительный методы определения комплекса теплофизических свойств (ТФС) образцов из твердых материалов основаны на дискретном во времени тепловом воздействии [1], т.е. эксперимент включает в себя стадию нагрева  $t \in [0; t_d]$  тепловым потоком постоянной мощности и стадию остывания  $t \in [t_d; t_k]$  (рис. 1). При этом расчет ТФС осуществляется по данным двух этих стадий благодаря применению временной интегральной характеристики (ВИХ) температуры вида (1):

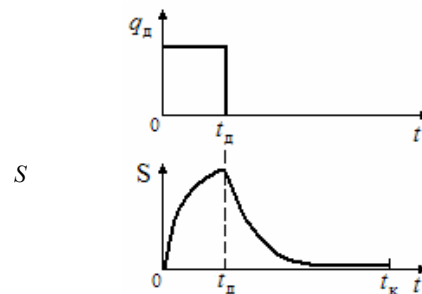
$$S^*(p) = \int_0^{\infty} \exp(-pt)S(t)dt, \quad (1)$$

где  $p > 0$  – параметр интегрального преобразования Лапласа;  $S(t) = \frac{2}{R^2} \int_0^R U(r, 0, t) r dr$  – измеряемая среднеинтегральная температура нагреваемого круга;  $R$  – радиус нагреваемого круга поверхности образца.

Такая организация эксперимента при неразрушающем контроле (НК) дает следующие преимущества по сравнению с известными методами.

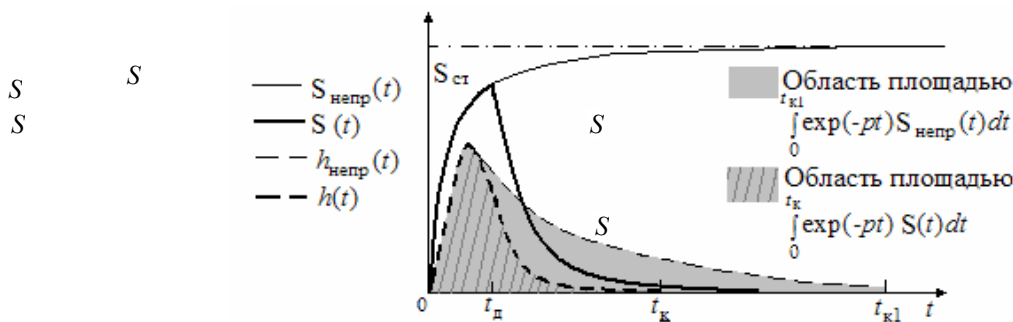
Во-первых, при определенной длительности теплового воздействия  $t_d$  температурное поле не успевает измениться в заданных границах небольшого образца и позволяет считать его полуограниченным в тепловом отношении телом, что положено в исходные математические модели методов.

Во-вторых, длительное тепловое воздействие при НК ТФС, осуществля-



**Рис. 1 Вид теплового воздействия  $q_d(t)$  и изменение температуры нагреваемого круга  $S(t)$**

мом на производстве между технологическими операциями, может привести к структурным превращениям еще не подвергнутых термической обработке полуфабрикатов, что исключает короткое тепловое воздействие. В-третьих, в расчетных формулах разработанных методов используется ВИХ измеряемой среднеинтегральной температуры нагреваемого круга  $S(t)$  вида (1), подынтегральная функция которой  $h(t) = \exp(-pt)S(t)$  при дискретном тепловом воздействии быстрее стремится к нулю, чем  $h_{непр} = \exp(-pt)S_{непр}(t)$  – при непрерывном нагревании до достижения стационарной температуры  $S_{ст} = S_{непр}(t_{к1})$  нагреваемого участка поверхности (рис. 2), как предполагают существующие методы. Благодаря чему вся активная часть эксперимента сокращается в 1,5 – 2 раза, что повышает оперативность методов, с одновременным снижением погрешности численного определения ВИХ вида (1), обусловленной конечным интервалом времени измерения  $S(t)$ .



**Рис. 2 Вид функций  $S(t)$ ,  $h(t) = \exp(-pt)S(t)$  при дискретном тепловом воздействии; при непрерывном –  $S_{непр}(t)$ ,  $h_{непр}(t) = \exp(-pt)S_{непр}(t)$ ; время окончания эксперимента при дискретном тепловом воздействии  $t_k$ ; при непрерывном –  $t_{к1}$**

Следует отметить также, что расчетные формулы импульсных методов получают на основании математических моделей, предполагающих бесконечно малое время действия источника тепла, что реализовать технически сложно, а аналитический вывод расчетных формул ТФС с учетом конечной длительности теплового воздействия, как реализовано в наших методах, позволяет избежать методических погрешностей, свойственных импульсным методам.

Для реализации разработанных методов спроектированы и созданы измерительные устройства (зонды) и автоматизированная система контроля (АСК) с использованием современной измерительно-вычислительной техники, позволяющие оперативно контролировать ТФС образцов малых размеров и различных форм, на поверхности которых можно выделить плоский круглый участок, из твердых материалов без нарушения их целостности.

В состав АСК входят (рис. 3): измерительно-вычислительный комплекс (ИВК), включающий в себя персональный компьютер (при использовании в лабораторных условиях) или программируемое микропроцессорное измерительно-вычислительное устройство (ИВУ) (при использовании в производственных условиях), аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП); блок согласования измерительного устройства с ИВК (БСИУ); измерительное устройство – выносной зонд; периферийные устройства.

Конструктивно измерительный зонд (рис. 4) состоит из двух основных блоков: металлического полого цилиндрического корпуса 1 и опорного цилиндра 2, выполненного из полиметилметакрилата. На нижнем основании опорного цилиндра закреплены при реализации: а) абсолютного метода – датчик теплового потока 3, электронагреватель 4 и датчик ИТ 5; б) сравнительного метода – электронагреватель 4 и ИТ 5. Соединительные провода интегратора 5 подведены к трем катушкам 6, представляющим собой три плеча измерительного неуравновешенного моста. На верхнем основании опорного цилиндра 2 закреплена винтами опорная металлическая втулка 7 для металлического полого стержня 8, который в совокупности с амортизатором 9, расположенной в нем пружины 10 создает необходимое усилие зонда на образец, т.е. стабильное контактное термическое сопротивление.

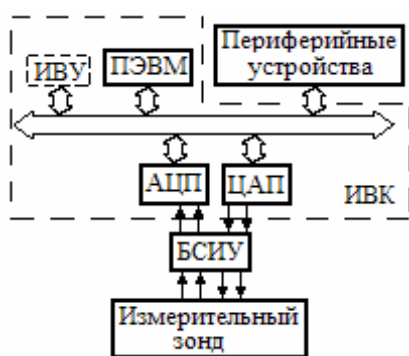


Рис. 3 Структурная схема АСК комплекса ТФС

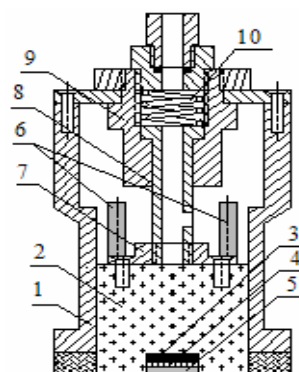


Рис. 4 Конструкция измерительного зонда

Разработанный адаптивный алгоритм работы АСК ТФС заключается в следующем:

1) Перед началом эксперимента оператор вводит толщину нагреваемого участка изделия, и АСК автоматически задает соответствующую мощность электронагревателя и время его действия, при которых температурное поле в заданных границах образца во время эксперимента не изменится.

2) Во время всего эксперимента производится измерение среднеинтегральной температуры нагреваемого круга  $S(t)$ , а измерение плотности теплового потока  $q_d$  (в случае абсолютного метода) или мощности нагревателя  $Q_d$  (в случае сравнительного метода) в момент времени  $t = t_d$ , после чего подача напряжения на нагреватель прекращается.

3) По окончании эксперимента (после остывания нагреваемой поверхности до температуры менее порога чувствительности измерительного средства) автоматически производится расчет ВИХ среднеинтегральной температуры нагреваемого круга по квадратурной формуле Симпсона.

4) Для того чтобы обеспечить оптимальное значение  $g_{\text{опт}}$  основного параметра наших методов  $g = pR^2/a$ , найденное из условия обеспечения минимума методической погрешности [2], автоматически рассчитываются ВИХ температуры при различных  $p$  из диапазона  $[p_{\text{min}}; p_{\text{max}}]$ , соответствующего диапазону возможных значений  $[a_{\text{min}}; a_{\text{max}}]$ , пока не будет найдено  $p_{\text{опт}}$  для искомых ТФС, которое даст из уравнений методов  $g = g_{\text{опт}}$ .

Таким образом, разработанные адаптивные процедуры ведения НК обеспечивают измерение комплекса ТФС с заданной точностью при различных размерах исследуемых образцов. При этом погрешность НК с помощью разработанной АСК не превышает: 1) для теплопроводности 7,1 % (абсолютный метод), 8,3 % (сравнительный метод); 2) для теплопроводности 5,2 % (абсолютный метод), 6,4 % (сравнительный метод).

#### Список литературы

1 Антонова, Л.Л. Теплофизический контроль качества керамических элементов радиотехнического и электротехнического назначения / Л.Л. Антонова, А.А. Чуриков // Состояние и проблемы измерений : сборник 9-й Всерос. науч.-техн. конф. – М., 2004. – С. 175 – 176.

2 Антонова, Л.Л. Проектирование оптимального режима проведения неразрушающего теплофизического контроля / Л.Л. Антонова, А.А. Чуриков // Вестник Метрологической Академии. – СПб., 2006. – Вып. 18. – С. 48 – 56.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЗАДАННОЙ ТОЛЩИНЫ ИССЛЕДУЕМОГО ОБРАЗЦА**

На практике неразрушающему контролю (НК) теплофизических свойств (ТФС) подвергаются образцы различных размеров и форм. Моделирование таких образцов полуограниченными в тепловом отношении телами позволяет получить аналитически точные и достаточно простые расчетные зависимости без учета их сложной геометрической формы и характеристик теплообмена с окружающей средой, что особенно важно при проведении теплофизического контроля на производстве. Однако условие полуограниченности исследуемых тел, положенное в исходные математические модели методов [1], может не выполняться. Размеры исследуемого тела могут оказаться не достаточно большими при определенных условиях эксперимента, и тогда произойдет так называемый «тепловой пробой», т.е. с противоположной к тепловому воздействию стороны исследуемого образца нарушится начальная температура, что повлияет на результат НК ТФС.

Контактные методы НК комплекса ТФС [1] предполагают наличие на поверхности исследуемого образца плоского участка в виде круга, через который производится нагрев и с которого снимается информация о температуре и тепловом потоке. С целью исключения влияния конечной толщины нагреваемого участка (конечных размеров исследуемого тела по координате  $z$ , рис. 1) на измеряемые в эксперименте тепловые параметры, необходимо определить такие режимные параметры эксперимента в зависимости от заданной толщины исследуемого образца, при которых будет выполняться исходное условие полуограниченности образца относительно теплового воздействия и обеспечиваться заданная точность результата НК комплекса ТФС.

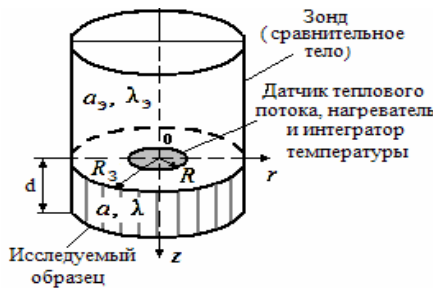
Так как расчетные формулы методов [1] получены в области интегрального преобразования Лапласа температуры и теплового потока по временной переменной, то и изменение температуры граничной поверхности  $z = d$  образца (рис. 1) необходимо исследовать во всем временном интервале эксперимента. Формула временной интегральной характеристики (ВИХ) температуры исследуемого тела для методов с дискретным во времени тепловым воздействием имеет вид [1]:

$$U^*(r, z, p) = \frac{(1 - \exp(-pt_d))q_d R}{p\lambda} \int_0^\infty \frac{\exp(-\sqrt{\xi^2 + p/a} z)}{\sqrt{\xi^2 + p/a}} J_1(R\xi) J_0(r\xi) d\xi,$$

где  $\lambda$  – теплопроводность и  $a$  – температуропроводность материала исследуемого тела;  $r, z$  – пространственные координаты;  $t$  – время;  $U(r, z, t)$  – избыточная, относительно начальной, измеряемая температура исследуемого тела;

$q_d(t) = \begin{cases} q_d & \text{при } 0 < t \leq t_d; \\ 0 & \text{при } t > t_d \end{cases}$  – плотность дискретного во времени теплового потока;  $t_d$  – время действия источника тепла;

$p > 0$  – параметр интегрального преобразования Лапласа;  $U^*(r, z, p)$  – интегральное преобразование Лапласа температуры по временной переменной;  $R$  – радиус плоского круглого электронагревателя;  $J_0$  и  $J_1$  – функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка.



**Рис. 1 Физическая модель системы из двух тел конечных размеров:**

$R_3$  – радиус измерительного зонда;  $\lambda_3$  и  $a_3$  – теплопроводность и температуропроводность сравнительного тела

Рассматриваемые методы предполагают тепловое воздействие от круглого плоского нагревателя. Известно, что при таком условии в цилиндрических координатах максимальная температура любой поверхности  $z = d$  исследуемого образца будет в точке  $r = 0$ , следовательно, достаточным является моделирование приведенной выше зависимости при  $r = 0$ :

$$U^*(0, z, p) = \frac{(1 - \exp(-pt_d))q_d R}{p\lambda} \int_0^\infty \frac{\exp(-\sqrt{\xi^2 + p/a} z)}{\sqrt{\xi^2 + p/a}} J_1(R\xi) d\xi. \quad (1)$$

С учетом используемых при выводе расчетных формул методов обозначений [1]:  $g(p) = \frac{pR^2}{a}$ ,  $\tau = pt_d$ ,  $\mu = \xi R$  выражение (1) преобразуется в следующее:

$$U^*(0, z, p) = \frac{R^3 q_d (1 - \exp(-\tau))}{a \lambda g} \int_0^\infty \frac{J_1(\mu) \exp\left(-\frac{z}{R} \sqrt{\mu^2 + g}\right)}{\sqrt{\mu^2 + g}} d\mu. \quad (2)$$

Численное моделирование температурного поля в области преобразований Лапласа с помощью зависимости (2) показало, что при радиусе нагревателя  $R = 5 \times 10^{-3}$  м и оптимальном значении параметра  $g = g_{\text{опт}} = 0,55$ , найденных из условия обеспечения минимальной методической погрешности результата НК ТФС [2], на изменение температуры поверхности  $z = d$  влияют величины  $\tau$  и  $q_d$ . Для исследуемых нами диапазонов  $\lambda = 0,6 \dots 3$  Вт/(м · К) и  $a = (0,3 \dots 1,2) \times 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с максимальное значение ВИХ температуры  $U_{\text{max}}^*(0, z, p)$  будет, как видно из зависимости (2), при  $\lambda_{\text{min}} = 0,6$  Вт/(м · К) и  $a_{\text{min}} = 0,3 \times 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с. Исходя из чего найдены допустимые значения  $\tau$  и  $q_d$ , при которых во время теплофизического эксперимента не происходит изменение температуры поверхности  $z = d$  исследуемого образца.

Причем, величина плотности дискретного теплового потока, направленного в исследуемое тело, выбиралась из одновременного удовлетворения еще двум условиям:

- максимально достигаемая избыточная температура поверхности  $z = 0$  не превышает 10 К, что обеспечивает постоянство ТФС в эксперименте;
- температура поверхности  $z = 0$  в момент времени 0,1 с превышает порог чувствительности используемого измерительного средства, что обеспечивает достаточно большое число информативных измерений в одном эксперименте.

Из зависимости  $g_{\text{опт}} = \frac{pR^2}{a}$  для исследуемого диапазона теплопроводности  $a$  при  $g_{\text{опт}} = 0,55$  и  $R = 5 \times 10^{-3}$  м находим диапазон возможных значений параметра интегрального преобразования Лапласа:

$$p_{\text{min}} = \frac{g_{\text{опт}} a_{\text{min}}}{R^2} = 0,0066 \text{ с}^{-1}, \quad p_{\text{max}} = \frac{g_{\text{опт}} a_{\text{max}}}{R^2} = 0,026 \text{ с}^{-1}. \quad (3)$$

На основании диапазона (3) для каждой заданной граничной поверхности  $z = d$  найдены плотность  $q_d$  и допустимое время действия  $t_d$  теплового потока (табл. 1), при которых не происходит изменение температуры поверхности  $z = d$  и, таким образом, соблюдается исходное условие математических моделей методов – полуограниченность исследуемого образца относительно теплового воздействия.

Таблица 1

| $d$ , м | $q_d$ , Вт/м <sup>2</sup> | $t_d$ , с | $d$ , м | $q_d$ , Вт/м <sup>2</sup> | $t_d$ , с |
|---------|---------------------------|-----------|---------|---------------------------|-----------|
| 0,01    | 500                       | 5         | 0,018   | 800                       | 16        |
| 0,011   | 500                       | 6         | 0,019   | 900                       | 18        |
| 0,012   | 600                       | 7         | 0,02    | 1000                      | 20        |
| 0,013   | 600                       | 8         | 0,021   | 1000                      | 24        |
| 0,014   | 700                       | 9         | 0,022   | 1200                      | 28        |
| 0,015   | 700                       | 10        | 0,023   | 1200                      | 34        |
| 0,016   | 800                       | 12        | 0,024   | 1200                      | 38        |
| 0,017   | 800                       | 14        | 0,025   | 1400                      | 42        |

#### Список литературы

- 1 Антонова, Л.Л. Методы и средства теплофизического контроля керамических изделий электротехнического назначения : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.11.13 / Л.Л. Антонова. – Тамбов, 2006. – 16 с.
- 2 Чуриков, А.А. Методика определения геометрических и временных параметров неразрушающего контроля комплекса теплофизических свойств / А.А. Чуриков, Л.Л. Антонова // Контроль. Диагностика. – М. : Машиностроение, 2006. – № 11. – С. 36 – 45.

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ РЕГУЛЯРНОГО РЕЖИМА 3-ГО РОДА\*

ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

В работе дано теоретическое обоснование методов регулярного режима третьего рода, предназначенных для контроля теплофизических характеристик твердых неметаллических материалов, решена задача оптимального проектирования устройства контроля, приведено описание методик контроля твердых неметаллических материалов, дается анализ результатов экспериментов. Метод контроля теплофизических свойств строится на базе следующей математической модели теплового процесса:

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (\tau > 0, -R < x < R); \quad (1)$$

$$T(x, 0) = T_0 = \text{const}; \quad (2)$$

$$-\lambda \frac{\partial T(R, \tau)}{\partial x} + \alpha [T_0 + (T_A - T_0)f(\tau) - T(R, \tau)] = 0; \quad (3)$$

$$\lambda \frac{\partial T(-R, \tau)}{\partial x} + \alpha [T_0 + (T_A - T_0)f(\tau) - T(-R, \tau)] = 0; \quad (4)$$

$$\text{где } f(\tau) = \begin{cases} 1, & 2k\tau_0 < \tau < (2k+1)\tau_0; \\ -1, & (2k+1)\tau_0 < \tau < (2k+2)\tau_0, \quad k = 1, 2, 3, \dots; \end{cases} \quad (5)$$

$T(x, \tau)$  – температура в точке  $x$  в момент времени  $\tau$ , К;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К);  $a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $T_A$  – амплитуда колебания температуры среды, К;  $\alpha$  – коэффициент теплообмена, Вт/(м<sup>2</sup> · К);  $\tau_0$  – период колебания, с.

Решение задачи (1) – (5) проводится в соответствии со следующей схемой:

- 1) раскладываем функцию  $f(\tau)$  в ряд Фурье;
  - 2) находим решение задачи (1) – (6) для каждого члена ряда;
  - 3) искомое решение записываем в виде суммы решений для каждого члена ряда.
- В частности решение для первого члена ряда

$$f(\tau) = \frac{2}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi \cdot \tau}{b} + \dots \quad (6)$$

при  $Bi = \frac{\alpha R}{\lambda} \rightarrow \infty$  и  $Fo = \frac{a\tau}{x^2} > 0,5$  имеет вид

$$\vartheta = \vartheta_{\max} \exp\left(-x \sqrt{\frac{\pi}{a\tau_0}}\right) \cos\left(\omega\tau - x \sqrt{\frac{\pi}{a\tau_0}}\right), \quad (7)$$

где  $\vartheta = \frac{T(x, \tau) - T_0}{T_A - T_0}$ .

Соотношение (7) является базовым для построения двух методов контроля температуропроводности:

– по отношению амплитуд гармонических колебаний, измеренных в двух точках образца  $a = \frac{\pi(x_2 - x_1)^2}{\tau_0 \left[ \ln \frac{\vartheta_m(x_1)}{\vartheta_m(x_2)} \right]^2}; \quad (8)$

– по величине сдвига фаз гармонических колебаний, измеренных в двух точках образца  $a = \frac{(x_2 - x_1)^2 \tau_0}{4\pi[\tau_3(x_2) - \tau_3(x_1)]^2}. \quad (9)$

Оценка погрешностей измерения температуропроводности проводится с использованием стандартной процедуры.

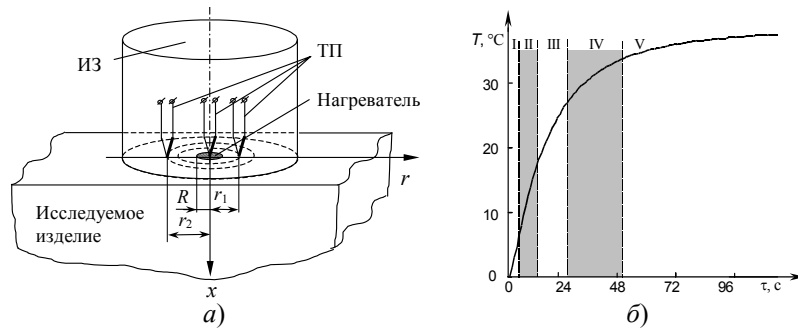
В работе решена задача оптимизации конструкции измерительного устройства (в смысле минимизации погрешностей измерения коэффициента температуропроводности), приводится описание экспериментальной установки и анализируются результаты эксперимента.

\* Работа выполнена под руководством д-ра техн. наук, профессора С.В. Пономарева

**ИМИТАЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СТРУКТУРНЫХ ПЕРЕХОДОВ В ПОЛИМЕРАХ**

Разработанный ранее метод [1 – 3], входящий в группу методов термического анализа, позволяет определять неразрушающим способом теплофизические свойства (ТФС) твердых материалов и фиксировать температурные характеристики структурных переходов в полимерных материалах (ПМ) по изменениям тепловой активности с ростом температуры. Теоретическую основу метода составляют аналитические закономерности распространения одномерного плоского температурного поля от поверхностного круглого источника тепла постоянной мощности при локальной регуляризации тепловых потоков в твердых телах, которые могут быть отнесены к классу плоского полупространства.

Согласно измерительной схеме (рис. 1, а), на исследуемое изделие осуществляется тепловое воздействие постоянной мощности с помощью встроенного в подложку измерительного зонда (ИЗ) нагревателя, выполненного в виде тонкого диска радиусом  $R$ . Начальное температурное распределение контролируется одновременно несколькими термоэлектрическими преобразователями (ТП), расположенными в центре нагревателя и на расстояниях  $r_i$  от центра в плоскости контакта подложки ИЗ и исследуемого тела. Центральным ТП в ходе эксперимента фиксируется термограмма – зависимость избыточной температуры  $T$  от времени.



**Рис. 1** Измерительная схема (а) и термограмма (б), зафиксированная в центре нагревателя на изделии из коксонаполненного фторопласта

Из рассмотрения характера изменения теплового потока, поступающего в изделие от действия нагревателя, на экспериментальной термограмме выделено пять участков (рис. 1, б). Участки II и IV – рабочие [1 – 3], характеризуются тем, что соответствующие им интервалы времени тепловой процесс проходит стадии регуляризации, т.е. тепловые потоки, поступающие в исследуемое тело и подложку зонда, сохраняются практически постоянными. На переходных участках I, III, V тепловые потоки изменяются во времени.

Известные решения краевых задач нестационарной теплопроводности, описывающие процесс распространения тепла в твердых телах с различными ТФС от плоского круглого нагревателя постоянной мощности, имеют весьма сложный вид и малопригодны для их использования при реализации неразрушающего метода. Однако известно, что распределение температуры от плоского круглого источника тепла постоянной мощности при малых значениях времени  $\tau$  близко к распределению температуры в плоском полупространстве [1, 2]. Поэтому для получения математической модели, описывающей процесс распространения тепла в исследуемой системе (изделие – зонд) на втором участке термограммы, зафиксированной центральным ТП, измерительная схема с плоским круглым нагревателем постоянной мощности заменена схемой с бесконечным плоским нагревателем. Это позволило получить расчетное соотношение, описывающее термограмму на втором (рабочем) участке [1, 2]:

$$T_1(0, \tau) = \frac{2q\sqrt{\tau}}{(\epsilon_1 + \epsilon_2)\sqrt{\pi}} - \frac{qc_n}{(\epsilon_1 + \epsilon_2)^2}, \quad (1)$$

где  $T_1$ ,  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  – избыточная температура, тепловые активности материалов исследуемого изделия и подложки ИЗ, соответственно;  $q$  – удельная поверхностная мощность нагревателя;  $\tau$  – время;  $c_n$  – теплоемкость единицы площади нагревателя. Индексы 1, 2 отнесены к материалам исследуемого изделия и подложки ИЗ, соответственно.

Для четвертого (рабочего) участка термограммы расчетное соотношение приведено в работах [1 – 3].

Численным моделированием температурных полей методом конечных элементов с помощью пакета ELCUT [4] определена адекватность полученной математической модели (1) реальному тепловому процессу на втором (рабочем) участке термограммы [5].

В данной работе приводятся результаты имитационного исследования, в ходе которого по результатам ряда вычислительных экспериментов получено уравнение регрессии для определения температуры середины второго участка термограммы  $\bar{T}_p$  в зависимости от тепловой активности  $\epsilon_1$  полимерного материала и удельной поверхностной мощности  $q$  нагревателя для ИЗ с подложкой из рипора (рис. 2). Уравнение имеет вид:

$$\bar{T}_p = 0,003q + 0,018\epsilon_1 - 26,24. \quad (2)$$



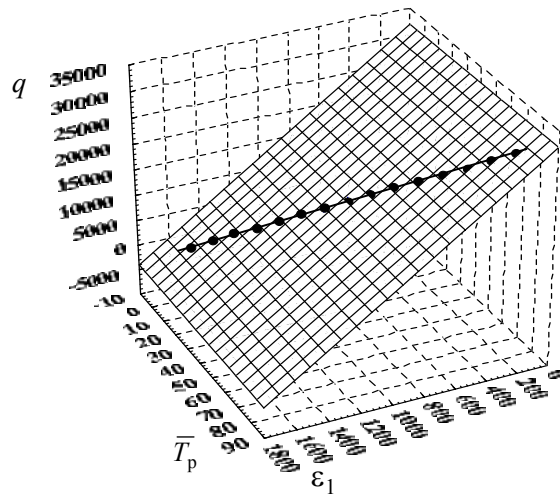


Рис. 2 Зависимость  $\bar{T}_p = f(q, \epsilon_1)$

Диапазоны варьирования переменных:  $150 \leq \epsilon_1 \leq 1550 \text{ Вт} \cdot \text{с}^{0,5}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $1000 \leq q \leq 29\,000 \text{ Вт}/\text{м}^2$ . Радиус нагревателя  $R = 4 \text{ мм}$ . Результаты регрессионного анализа представлены на рис. 2. Проверена значимость уравнения (2).

На рис. 3 и 4 представлены зависимости  $\bar{T}_p = f(\epsilon_1)$ ,  $\bar{T}_p = f(R)$  и  $\bar{T}_p = f(q)$ , полученные численным моделированием. Условия моделирования:  $R = 4 \text{ мм}$ ;  $\epsilon_1 = 758 \text{ Вт} \cdot \text{с}^{0,5}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ; кривые 1–4 на рис. 3 соответствуют 1)  $q = 30250$ ; 2)  $q = 20500$ ; 3)  $q = 10750$ ; 4)  $q = 1000$ ; кривые 1–8 на рис. 4 соответствуют 1)  $R = 6,5$ ; 2)  $R = 5$ ; 3)  $R = 4,5$ ; 4)  $R = 4$ ; 5)  $R = 3,5$ ; 6)  $R = 3$ ; 7)  $R = 2,5$ ; 8)  $R = 2$ .

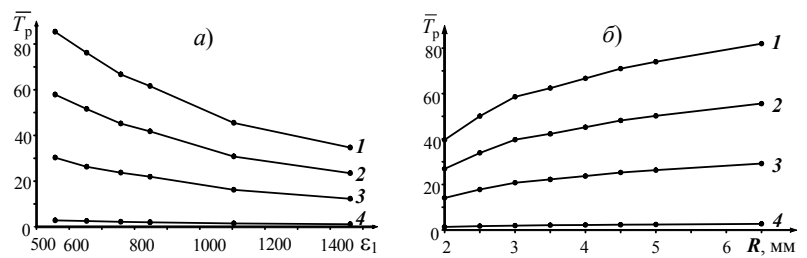


Рис. 3 Зависимости: а –  $\bar{T}_p = f(\epsilon_1)$  и б –  $\bar{T}_p = f(R)$

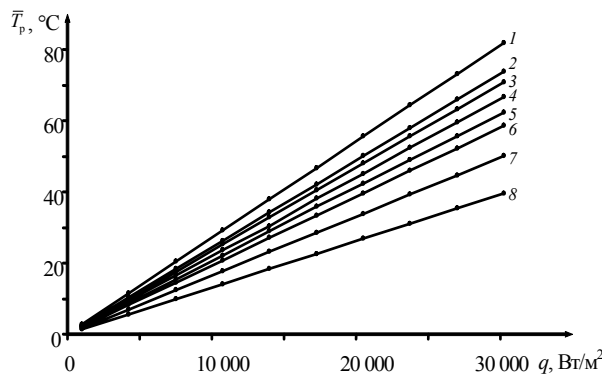


Рис. 4 Зависимости  $\bar{T}_p = f(q)$  при  $\epsilon_1 = 758 \text{ Вт} \cdot \text{с}^{0,5}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

и различных  $R$  (мм):

1 –  $R = 6,5$ ; 2 –  $R = 5$ ; 3 –  $R = 4,5$ ;  
4 –  $R = 4$ ; 5 –  $R = 3,5$ ; 6 –  $R = 3$ ; 7 –  $R = 2,5$ ; 8 –  $R = 2$

По уравнению регрессии (2) и полученным данным имитационного исследования, представленным на рис. 3 и 4, определяют диапазон температур второго участка термограммы, в котором возможна регистрация структурных переходов в ПМ по отклонениям зависимостей тепловой активности с ростом температуры.

#### Список литературы

- 1 Пат. 2167412 РФ, МПК G 01 N 25/18. Способ комплексного определения теплофизических свойств материалов / Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова, Ю.Л. Муромцев, И.В. Рогов. – № 99103718/28 ; заявл. 22.02.99 ; опубл. 20.05.2001, Бюл. № 14.
- 2 Об одном методе термического анализа для неразрушающего контроля теплофизических свойств полимеров / Н.Ф. Майникова, Ю.Л. Муромцев, И.В. Рогов, А.А. Балашов // Пластические массы. – 2001. – № 2. – С. 30 – 33.
- 3 Об одном методе исследования твердофазных переходов в полимерах / Н.Ф. Майникова, Ю.Л. Муромцев, Н.П. Жуков, А.А. Балашов // Пластические массы. – 2002. – № 6. – С. 23 – 26.
- 4 ELCUT: Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.1. Руководство пользователя. – СПб. : Производственный кооператив ТОР, 2003. – 249 с.
- 5 Определение условий адекватности модели распределения тепла в плоском полупространстве реальному процессу при теплофизическом контроле / Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова, А.А. Балашов, С.С. Никулин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2006. – Т. 12, № 3А. – С. 610 – 616.

**МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ  
МЕТАЛЛОФТОРОПЛАСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Современный уровень развития различных отраслей производства непрерывно требует разработки конструкционных материалов со специальными свойствами. Использование многослойных композиций позволяет при сочетании различных металлов и неметаллов получить в производимых из них изделиях высокие эксплуатационные характеристики. Указанное обстоятельство объясняет актуальность и целесообразность в настоящее время производства подшипников скольжения из металлофторопластовых материалов. Непрерывный технологический контроль параметров таких материалов является важным условием повышения качества производимых из них изделий.

Представлен метод определения концентрации компонент, входящих в прирабочный слой металлофторопластовой ленты.

Суть метода заключается в определении теплопроводности прирабочного слоя. Поскольку прирабочный слой представляет собой композиционный материал (фторопласт с наполнителем дисульфид молибдена), то определив теплопроводность этого материала, можно определить концентрации входящих компонент по зависимости [1]

$$m_2 = \frac{(2 + \nu)\left(\frac{\bar{\lambda}}{\lambda_1} - 1\right)}{\frac{\bar{\lambda}}{\lambda_1}(\nu - 1) - 2\nu - 1}, \quad (1)$$

где  $\nu = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$ ;  $\lambda_1$  – теплопроводность фторопласта-4;  $\lambda_2$  – теплопроводность дисульфида молибдена;  $m_2 = 1 - m_1$ ;  $m_1, m_2$  – объемные концентрации компонентов верхнего слоя (соответственно фторопласта-4 и дисульфида молибдена).

Для определения теплопроводности материала прирабочного слоя осуществляют тепловое воздействие точечным источником тепловой энергии, измеряют избыточную температуру нагреваемой поверхности в точке, расположенной за источником на заданном расстоянии  $X$  по линии движения источника.

Избыточная температура поверхности в точке, перемещающейся вслед за источником по линии его движения со скоростью, равной скорости перемещения источника, определяется формулой

$$T_i(x) = \frac{q_i}{2\pi\bar{\lambda}x}, \quad (2)$$

где  $T_i(x)$  – избыточная температура нагреваемой поверхности полубесконечного изделия в точке, перемещающейся вслед за источником по линии его движения, К;  $q_i$  – мощность источника, Вт;  $\bar{\lambda}$  – среднеинтегральная теплопроводность материала, Вт/(м·К);  $x$  – расстояние между точкой контроля температуры и центром пятна нагрева поверхности исследуемого изделия сосредоточенным источником энергии.

Тогда из формулы (2) среднеинтегральная теплопроводность материала определяется как:

$$\bar{\lambda} = \frac{q_i}{2\pi T_i(x)x}. \quad (3)$$

Затем изменяют мощность источника в соответствии с зависимостью

$$q_i = q\left(\frac{20 - i}{20}\right), \quad i = 1, 2, \dots, 20, \quad (4)$$

и измеряют термометром новые значения температур при каждой мощности источника энергии, и по формуле (3) определяют новые значения среднеинтегральной теплопроводности материала верхнего слоя. Изменение значения теплопроводности возможно до тех пор, пока глубина прогрева будет превышать толщину материала прирабочного слоя. При независимости теплопроводности от уменьшения мощности источника нагрева, ее значение и будет теплопроводностью прирабочного слоя. Таким образом может быть определена и рассчитана теплопроводность материала прирабочного слоя.

Список литературы

**ИЗМЕРЕНИЕ ПЛОТНОСТИ В МАЛЫХ ОБЪЕМАХ  
ЖИДКОСТИ БАРБОТАЖНЫМ МЕТОДОМ**

В настоящее время разработано большое количество различных методов контроля плотности жидкости [1, 2], среди которых широкое распространение благодаря своей надежности, простоте реализации, высокой пожаро- и взрывобезопасности получили барботажные методы, сущность которых состоит в пропускании газа с заданным расходом  $Q$  в виде отдельных пузырьков через слой контролируемой жидкости и измерении давления  $P_{и}$  на выходе газоподводящей трубки как функции контролируемого параметра.

Основным недостатком барботажных методов является невозможность их использования при небольшой глубине погружения газоподводящей трубки в контролируемую жидкость из-за большой погрешности измерения, обусловленной влиянием поверхностного натяжения на результат измерения плотности. Для устранения этого недостатка был разработан барботажный метод, позволяющий повысить точность измерения плотности при малой глубине погружения газоподводящей трубки за счет дополнительного измерения частоты  $f$  следования пузырьков.

Состояние равновесия газожидкостной системы в момент отрыва пузырька от конца газоподводящей трубки описывается системой уравнений [3]:

$$\begin{cases} P_{и} = \rho_{ж}gH + \frac{4\sigma_{ж}}{d_0} + P_0; \\ V_0g(\rho_{ж} - \rho_{г}) = \pi\sigma_{ж}d_0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $d_0$  – диаметр газоподводящей трубки;  $P_0$  – избыточное давление над поверхностью жидкости;  $\rho_{ж}$  – плотность контролируемой жидкости;  $g$  – ускорение свободного падения;  $H$  – глубина погружения трубки;  $V_0 = Q/f$  – равновесный объем пузырька;  $\sigma_{ж}$  – поверхностное натяжение жидкости;  $\rho_{г}$  – плотность газа.

В результате решения системы (1) получим выражение для нахождения плотности жидкости по известным  $P_{и}$  и  $f$ :

$$\rho_{ж} = \frac{K_1(P_{и} - P_0)}{1/f + K_2}, \quad (2)$$

где  $K_1 = \frac{\pi d_0^2}{4Qg}$ ,  $K_2 = \frac{H\pi d_0^2}{4Q}$  – коэффициенты пропорциональности при  $d_0$ ,  $V_0$ ,  $H = \text{const}$ .

Предложенный метод прошел экспериментальную проверку и доказал свою эффективность при измерении плотности маловязких жидкостей с вязкостью  $\eta_{ж} < 2 \cdot 10^{-3}$  Па · с. При этом относительная погрешность измерения не превысила 2,2 %.

В результате дополнительных исследований было установлено, что с ростом динамической вязкости точность измерения падает за счет влияния сил вязкого трения на отрывной диаметр пузырька. Так, например, для оливкового масла ( $\eta_{ж} = 90 \cdot 10^{-3}$  Па · с) относительная погрешность измерения плотности составила 8 %, а для глицерина ( $\eta_{ж} = 1393 \cdot 10^{-3}$  Па · с) – 60 %.

С учетом действия сил вязкого трения система (1), описывающая состояние равновесия газожидкостной системы в момент отрыва пузырька, примет вид

$$\begin{cases} P_{и} = \rho_{ж}gH + \frac{4\sigma_{ж}}{d_0} + P_0; \\ V_0g(\rho_{ж} - \rho_{г}) = \pi\sigma_{ж}d_0 + 6\eta_{ж}\pi r_1 v_1, \end{cases} \quad (3)$$

где  $v_1$  – скорость центра пузырька с равновесным объемом  $V_1$ ;  $r_1$  – равновесный радиус пузырька.

Так как  $v_1 = \frac{Q}{\pi r_1^2}$ , из (3) получим выражение для вычисления плотности вязких жидкостей:

$$\rho_{ж} = \frac{K_1 f (P_{и} - P_0) - K_2 \eta_{ж} \sqrt[3]{f^4}}{K_3 + K_4 f}, \quad (4)$$

где  $K_1 = \pi d_0^2$ ,  $K_2 = 24 \cdot \sqrt[3]{\frac{4}{3}} \pi Q^2$ ,  $K_3 = 4Qg$ ,  $K_4 = \pi d_0^2 g H$  – коэффициенты пропорциональности при  $d$ ,  $H$ ,  $Q$ ,  $g = \text{const}$ .

Таким образом, измерение  $P_{и}$  и  $f$  позволяет определить плотность жидкости с известной вязкостью  $\eta_{ж}$  при небольшой глубине погружения газоподводящей трубки в контролируемую жидкость.

Экспериментальная проверка метода доказала его эффективность при измерении плотности жидкостей с динамической вязкостью в диапазоне 0,002 ... 0,100 Па · с. При этом относительная погрешность измерения не превысила 2,4 %.

Список литературы

2 Кулаков, М.В. Технологические измерения и приборы для химических производств: учебник для вузов / М.В. Кулаков. – М. : Машиностроение, 1983. – 424 с.

3 Лаптев, В.И. Барботажно-пьезометрические методы контроля физико-химических свойств жидкостей / В.И. Лаптев. – М. : Энергоиздат, 1984. – 79 с.

*Н.А. Булгаков, Д.М. Мордасов, С.В. Енифанов*

ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

### **О ВОЗМОЖНОСТИ ПНЕВМОДИНАМИЧЕСКОГО ИЗМЕРЕНИЯ ПОРИСТОСТИ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА**

Согласно «Системе показателей качества продукции», для большинства продуктов в виде сыпучих материалов пористость является показателем конструктивности или показателем назначения.

Пористость как отношение суммарного объема открытых пор к общему объему, занятому сыпучим материалом, контролируют при периодическом контроле качества на предприятии-изготовителе, при геологической разведке, а также при входном контроле на предприятии-потребителе.

До настоящего времени проблема разработки неразрушающих, дешевых и простых по конструктивной реализации методов измерения пористости сыпучих материалов остается актуальной.

Предложено использовать в качестве физической основы измерения эффекты, возникающие при динамическом взаимодействии газа с сыпучим материалом. Подача газа в непроточную измерительную емкость с сыпучим материалом сопровождается ростом давления в ней. При этом заполнение измерительной емкости может осуществляться как непрерывно (с постоянным расходом), так и импульсно. В результате теоретического описания происходящих пневмодинамических процессов получена зависимость скорости изменения давления в измерительной емкости от пористости сыпучего материала. При этом сыпучий материал модельно рассматривается в виде пневматического аperiодического звена второго порядка.

Теоретические и экспериментальные исследования пневмодинамических эффектов позволили доказать, что на их основе могут быть разработаны методы измерения пористости сыпучих материалов.

Разработано устройство для реализации пневмодинамического метода измерения пористости сыпучих материалов, позволяющее существенно повысить надежность контроля объемных поглотителей веществ с развитой поверхностью, а также дисперсных веществ, не допускающих смачивания.

*Л.А. Ведешкина*

ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

### **ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ, КОНТРОЛИРУЕМЫХ В ПРОЦЕССЕ РАССИРОПКИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СПИРТА ИЗ МЕЛАССЫ\***

Реорганизация спиртовой отрасли по пути интенсификации позволяет преодолеть топливно-энергетические, сырьевые и экологические затруднения путем создания более эффективного комбинированного производства с рациональным использованием основных производственных фондов. Внедрение комплексной переработки мелассы на спирт и другие продукты (полная утилизация мелассы и послеспиртовой мелассной барды) позволяет не только оздоровить окружающий воздушный бассейн и почвенную среду, но и увеличить ресурсы биологически ценных пищевых и кормовых средств [1].

В натуральном виде меласса не сбраживается дрожжами, поэтому для протекания биохимических процессов мелассу необходимо разбавлять водой до концентрации 20–28 % СВ (сухих веществ).

Помимо обычных меласс, в производстве спирта иногда используются дефектные мелассы, состав которых не вполне отвечает требованиям технологического регламента. При переработке дефектных меласс выход спирта значительно ниже и определяется индивидуально для каждой партии сырья в установленном порядке. Дефектность выражается в изменении плотности, коэффициента светопропускания, наличии или отсутствии посторонних примесей. Эти параметры отслеживать важно, но, прежде всего, в таких случаях важно исследовать количество сахаров, которые, собственно, и сбраживаются. Таким образом, необходим постоянный контроль концентрации сахара в растворах мелассы. Цель контроля – создание оптимальных условий для последующей стадии технологического процесса – ферментации.

Интенсивность и время завершения процесса ферментации определяются такими факторами, как температура ферментационной среды и содержание в ней сахаров. Следовательно, необходимо обеспечить хранение и использование информации, касающейся таких параметров технологического процесса, как:

- расход и температура для мелассы, холодной и горячей воды – на входе в рассиропник;
- концентрация сахаров и температура в растворах мелассы – на выходе из рассиропника.

При выборе устройства для контроля концентрации в растворах мелассы необходимо обеспечить:

1) возможность получения информации об изменениях теплофизических характеристик (ТФХ) потоков технологических жидкостей непосредственно в ходе эксперимента (необходимо, чтобы математические модели для вычисления ТФХ были достаточно простыми и позволяли проводить автоматическую обработку первичной измеряемой информации в про-

\* Работа выполнена под руководством д-ра техн. наук, профессора С.В. Пономарева

цессе эксперимента);

2) необходимую точность измерений, находящуюся на уровне современных требований к методам и устройствам для измерения ТФХ жидкостей [2].

Контроль ТФХ растворов меласс удобнее производить методом ламинарного режима. Устройство первичного измерительного преобразователя – металлическая трубка, на которую навит нагреватель и через которую снизу вверх (чтобы вектора скорости и конвекции совпадали) пропускается исследуемая жидкость. На участке после нагревателя расположен точечный термистор, с помощью которого измеряется температура стенки трубки сначала при выключенном нагревателе, а потом при включенном нагревателе после выхода на стационарный режим. Таким образом, температура трубки зависит от ТФХ жидкости, протекающей по измерительной трубке (ИТ). Устройство реализует метод измерения теплоемкости раствора, по величине которой можно определять концентрацию сахаров.

В процессе градуировки устройства необходимо подготовить эталонные растворы с различной концентрацией сахаров, для каждого из них измерить необходимые параметры и занести их в базу данных.

Для каждого из измерений, помимо начального и конечного значений температуры жидкости, проходящей по трубке, необходимо хранить также время выхода на стационарный режим работы при нагреве и при остывании жидкости.

Необходимо снятие статических характеристик для широкого диапазона начальных значений температур (температура воздуха в цехе может существенно меняться в зависимости от времени года).

Таким образом, дополнительный контроль концентрации сахаров в растворах дефектных меласс после проведения градуировки можно производить путем сравнения параметров, полученных в результате эксперимента с параметрами, находящимися в базе данных, и на основании полученных результатов определять необходимость изменения режимных параметров процесса расщипки.

#### Список литературы

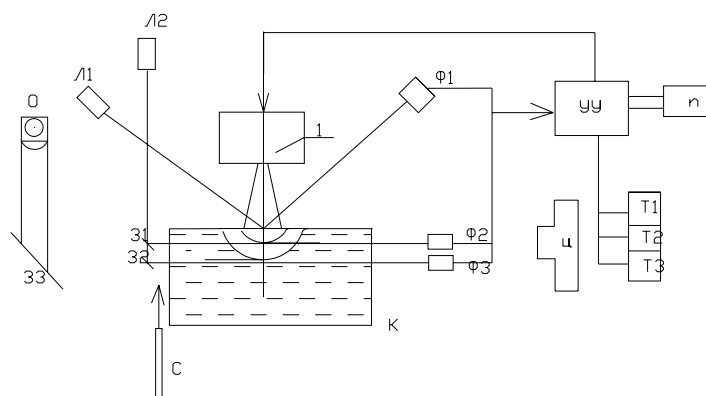
- 1 Переработка мелассы на спирт и другие продукты по безотходной технологии / В.Г. Артюхов, В.Г. Гарбаренко, Я.С. Гайворонский и др. : под ред. П.В. Рудницкого. – М. : Агропромиздат, 1985. –287 с.
- 2 Пономарев, С.В. Методы и устройства для измерения эффективных теплофизических характеристик потоков технологических жидкостей / С.В. Пономарев, С.В. Мищенко. – Тамбов : Изд-во ТГТУ, 1997. – 249 с.

*Н.М. Гребенникова*

ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

#### УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТРУИ ГАЗА С ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТЬЮ

На основании теоретических и экспериментальных исследований взаимодействия газовой струи с поверхностью вязкой жидкости разработана и изготовлена установка для исследования геометрии и динамики движения лунки, образующейся при взаимодействии вязкой оптически прозрачной жидкости с турбулентной газовой струей. Принципиальная схема представлена на рис. 1.



**Рис. 1 Принципиальная схема установки:**

1 – электропневматический генератор турбулентной струи; Л1, Л2 – полупроводниковые лазеры; Ф1, Ф2, Ф3 – фотодиоды; 31 – полупрозрачное зеркало; 32, 33 – зеркала; С – стекло с координатной сеткой; О – осветитель; Ц – цифровая камера; К – стеклянная прямоугольная кювета; (О, 33, Ц – показаны развернутыми на 90 градусов по горизонтали); УУ – контроллер; n – датчик количества повторов

*Работа установки в режиме регистрации с использованием видео/фото. При использовании цифровой камеры паралл-*

лельный световой поток, отраженный зеркалом ЗЗ, проходит прозрачную координатную сетку, кювету с исследуемой жидкостью и попадает в объектив. Оптическая система камеры сфокусирована на координатную сетку. Кювету с исследуемой жидкостью с помощью механизма вертикального перемещения устанавливают так, чтобы отраженный от поверхности жидкости луч лазера попал в метку Ф1. В этом случае поверхность жидкости будет расположена на определенном расстоянии от среза сопла. Включается камера и через некоторый интервал времени включается импульсный генератор струи, одновременно включается индикатор его работы. Образующаяся на поверхности исследуемой жидкости лунка рассеивает проходящий световой поток от осветителя. При таком способе освещения и регистрации камера фиксирует теневое изображение динамики роста лунки в координатной сетке. После заданного интервала времени генератор выключается и записывается динамика восстановления лунки.

*Работа установки в режиме регистрации времени прохождения нижней границей лунки двух, заранее заданных глубин.* После нажатия кнопки «пуск» контроллер обнуляет таймеры Т1, Т2, Т3, затем включает электропневматический генератор турбулентной струи. Турбулентная струя воздействует на поверхность жидкости. Деформация поверхности газовой струей нарушает условие отражения лазерного луча, при этом срабатывает фотодатчик Ф1, включаются таймеры Т1, Т2. Под действием струи объем лунки растет и при достижении ее значения глубины  $h_1$ , срабатывает фотодатчик Ф2 «глубина  $h_1$ ». Контроллер останавливает таймер Т1 и включает таймер Т3. При достижении нижней границей «растущей» лунки глубины  $h_2$  срабатывает фотодатчик Ф3 «глубина  $h_2$ » и контроллер останавливает таймеры Т2, Т3, при этом выключается электропневматический генератор турбулентной струи. Начинается процесс восстановления поверхности жидкости. При полном восстановлении срабатывает фотодатчик Ф1. Контроллер анализирует количество повторов (заданных и выполненных), и при несовпадении этих значений цикл повторяется.

Габаритные размеры изготовленной установки позволяют помещать ее в температурную камеру ТВТ-1 для исследования температурных зависимостей жидкости.

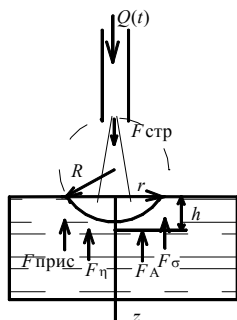
Основные характеристики установки:

- абсолютная погрешность измерения геометрии лунки не превышает  $\pm 0,25$  мм;
- погрешность измерения временных промежутков для видеозаписи с разрешением  $640 \times 480$  пикселей не более  $\pm 0,033$  с, а при цифровой регистрации  $\pm 0,001$  с.

**Н.М. Гребенникова, В.Б. Вязовов**

ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

### МОДЕЛЬ ВЕРТИКАЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ЛУНКИ, ОБРАЗОВАННОЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ



**Рис. 1** Силы, действующие в двухфазной системе струя газа – жидкость

Разработан бесконтактный метод для определения вязкости жидкостей. В основе метода лежит вертикальное воздействие струей газа на поверхность жидкости. Давление газа в струе, на определенном расстоянии от сопла, из которого происходит истечение, постоянно (неизменно) в одних и тех же условиях. При этом на поверхности жидкости, находящейся до этого в статическом состоянии, формируется углубление (лунка).

Со стороны жидкости действуют следующие силы  $F_{ж}$ : сила Архимеда  $F_{Арх}$ ; результирующая сил поверхностного натяжения  $F_{п.н.}$ ; сила вязкого трения  $F_{в.т.}$ ; инерционная сила  $F_{и.}$ . На стадии формирования лунки все указанные силы действуют вверх.

Газодинамическая сила струи  $F_{стр}$  действует вниз (направлена противоположно силам жидкости). Движение лунки со скоростью  $u$  в нижней точке происходит при условии практического равенства сил, действующих со стороны струи, и сил, действующих со стороны жидкости.

Таким образом, модель движения можно записать в форме  $F_{стр} = F_{ж}$  или

$$F_{стр} = F_{Арх} + F_{п.н.} + F_{в.т.} + F_{и.} \quad (1)$$

Архимедова сила определяется объемом  $V$  погруженного тела, плотностью жидкости  $\rho_{ж}$ , в которое погружено тело, ускорением свободного падения  $g$  по формуле

$$F_{Арх} = V \rho_{ж} g.$$

В нашем случае тело представляет собой воздух, заполняющий лунку. Для расчета объема тела примем, что лунка имеет форму сферической поверхности (сегмента) радиусом  $R$ , а максимальная глубина погружения  $h$  не превышает значения радиуса лунки  $r$ , т.е.  $h \leq r$ .

При этих условиях архимедова сила вычисляется по зависимости:

$$F_{Арх} = \pi \rho_{ж} g h^2 \left( R - \frac{h}{3} \right).$$

Сила поверхностного натяжения  $F_{п.н.}$  обусловлена свойством жидкости к сокращению свободной поверхности. Измене-

ние силы поверхностного натяжения происходит за счет изменения радиуса кривизны поверхности.

Значение результирующей силы поверхностного натяжения определяется по формуле:

$$F_{п.н.} = \pi \frac{2\sigma}{R} h(2R - h).$$

Формирование лунки вызывает движение внутренних слоев и, как следствие, появление силы вязкого трения  $F_{в.т.}$ , рассчитать значение которой можно по зависимости:

$$F_{в.т.} = 3\pi\mu Ru \left(1 - \frac{R-h}{R}\right).$$

В процессе формирования лунки в движение вовлекаются не только поверхностные, но и более отдаленные слои жидкости. Они образуют присоединенную массу, влияние которой характеризуется инерционной силой  $F_{и.}$ :

$$F_{и.} = \frac{1}{3} \pi \rho R^3 \left( \left(1 - \frac{h}{R}\right)^3 - 1 \right) \frac{du}{dt}.$$

После подстановки значений соответствующих сил в уравнение 1 получим модель движения лунки:

$$F_{стр} = \pi \rho g h^2 \left(R - \frac{h}{3}\right) + \pi \frac{2\sigma}{R} h(2R - h) + 3\pi\mu Ru \left(1 - \frac{R-h}{R}\right) + \frac{1}{3} \pi \rho R^3 \left( \left(1 - \frac{h}{R}\right)^3 - 1 \right) \frac{du}{dt}.$$

Проведено исследование воздействия струи газа на поверхность высоковязких жидкостей. Получены данные о временной зависимости формирования лунки.

Измерение времени формирования лунки определенного размера и формы ( $r$ ,  $h$ ) позволяет определять физико-механические свойства жидкости (поверхностное натяжение, вязкость).

***С.В. Енифанов, Д.М. Мордасов***

ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

## **СТРУЙНЫЙ ГЕНЕРАТОР В УСТРОЙСТВАХ КОНТРОЛЯ ПЛОТНОСТИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ**

При контроле плотности частиц сыпучих материалов широко применяются методы газового замещения, разновидностью которых являются пневмодинамические методы. В пневмодинамических методах об искомой величине судят либо по времени достижения давлением в измерительной емкости установившегося значения, либо по частоте совершаемых колебаний. При этом измерение времени может быть осуществлено с помощью простых технических средств с высокой точностью.

Нами предложено использовать струйный генератор колебаний, построенный на основе струйного устройства памяти для измерения плотности сыпучих материалов.

Работа устройства для измерения плотности частиц сыпучего материала основана на эффекте взаимодействия струй газа.

На вход устройства подается давление. Струя газа по каналу отрицательной обратной связи поступает на вход аperiодического звена I порядка, состоящего из ламинарного пневмосопротивления и измерительной емкости с контролируемым сыпучим материалом. В момент достижения определенного давления в емкости поток воздуха, вытекающего из канала отрицательной связи, переключает основную струю в инверсный канал и канал положительной обратной связи, поддерживающий переключенное состояние струи питания. Давление в измерительной емкости падает до величины, при которой вновь начинает действовать отрицательная обратная связь. Далее процесс происходит аналогично изложенному выше.

Таким образом, о плотности вещества сыпучего материала судят по длительности выходных импульсов либо по их периоду.

Достоинствами разработанного устройства являются его малые габариты, питание осуществляется от источника низкого давления, в конструкции отсутствуют подвижные элементы. Указанные достоинства делают устройство дешевым, высоконадежным и позволяют использовать его для контроля веществ в условиях отсутствия централизованного источника питания.

Кроме того, при изучении веществ с развитой поверхностью, активно проявляющих сорбционные свойства, в качестве рабочей среды возможно применение различных инертных газов.

При использовании такой конструкции возникает возможность проведения непрерывных многократных измерений, что, в свою очередь, позволяет подвергнуть результаты измерения статистической обработке.

*Э.Р. Заянов, А.А. Гиниятуллин, В.И. Горбатов,  
А.А. Старостин, М.А. Поццов, В.В. Шангин*

Институт теплофизики УрО РАН (г. Екатеринбург)

## **АППАРАТУРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ В РЕЖИМЕ СУБСЕКУНДНОГО НАГРЕВА**

Разработана и создана автоматизированная аппаратура для измерения теплофизических свойств твердых тел методом температурных волн при скоростях нагрева образца в вакуумной ячейке до 1000 К/с и частотах модуляции теплового потока до 20 кГц.

Установка основана на базе твердотельного технологического лазера ИАГ-Nd типа ЛТН-103. Мощность лазера достигает 200 Вт в многомодовом режиме.

Использование излучения лазера как для нагрева образца, так и для создания в нем температурных волн стало возможным за счет выбора оптимального соотношения между величиной области нагрева и размерами площадки, с которой производится регистрация температурных волн на поверхности образца. Это потребовало использования расфокусированного лазерного излучения и, как следствие, применения лазеров с большой мощностью излучения и оптическими устройствами для формирования луча.

Наши исследования показали, что на результаты измерений теплофизических свойств существенное влияние оказывают флуктуации мощности нагрева образца, возникающие за счет механических сотрясений корпуса лазера, непостоянства тока ламп накачки, а также термооптических искажений активных элементов квантового генератора. Уменьшение влияния флуктуаций мощности нагрева потребовало упругой амортизированной развязки оптической системы на жестком основании с остальным оборудованием, фильтрации и стабилизации тока накачки, применения акустооптического модулятора, а также подбора режима работы лазера с введением компенсирующих обратных связей на устройство регулирования выходной мощности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ. Проект № 07-08-00750а, 06-08-01324а.

*И.О. Котов<sup>1</sup>, В.Н. Чернышов<sup>1</sup>, Д.А. Дмитриев<sup>2</sup>,  
П.А. Федюнин<sup>2</sup>*

1 – ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»,

2 – Тамбовское высшее военное авиационное инженерное  
училище радиоэлектроники

## **МИКРОВОЛНОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛОВ**

Разработанный нами фазорный метод определения комплексной диэлектрической проницаемости  $\hat{\epsilon}$  материалов [1] позволяет также по характеристикам рассеянных объектом радиоволн определять теплофизические характеристики материалов, такие как влажность и теплопроводность.

Суть предлагаемого способа заключается в импульсном зондировании специально подготовленного образца из исследуемого материала с линейными размерами больше длины волны электромагнитной волны с управляемой вращающейся поляризацией и определении по изменению температуры материала влажности по объему взаимодействия, а по моменту наступления теплового равновесия – теплопроводности исследуемого материала.

Структурная схема, реализующая данный способ, представлена на рис. 1. Зондирование материала осуществляется нормально его поверхности приемопередающей антенной специальной конструкции на сдвоенном Н-волноводе.

С помощью блока терморпар измеряется начальная температура  $T_1$  поверхности материала. Генератор СВЧ переводится в режим генерирования радиоимпульсов постоянной длительности  $\tau_n$ , амплитуды  $A_m$  и частоты повторения  $F_m$  посредством импульсного модулятора, управляемого микропроцессором. Одновременно включается счетчик видеоимпульсов и производится отсчет числа импульсов. По достижении заданной температуры  $T_2$  фиксируется число  $N$  генерируемых видеоимпульсов и в МПУ определяется величина влажности  $W$  в объеме материала [2, 3]:

$$\Delta T = (T_2 - T_1) = K_N W,$$

где  $K_N$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от числа видеоимпульсов.

Объем взаимодействия поля падающей электромагнитной волны с материалом будет определяться эффективным радиусом зоны излучения антенны  $R_{эф}$  и глубиной проникновения  $\Delta$  поля плоской волны в материал  $V_{вз} = \pi R_{эф}^2 (\lambda_r) \Delta$ .



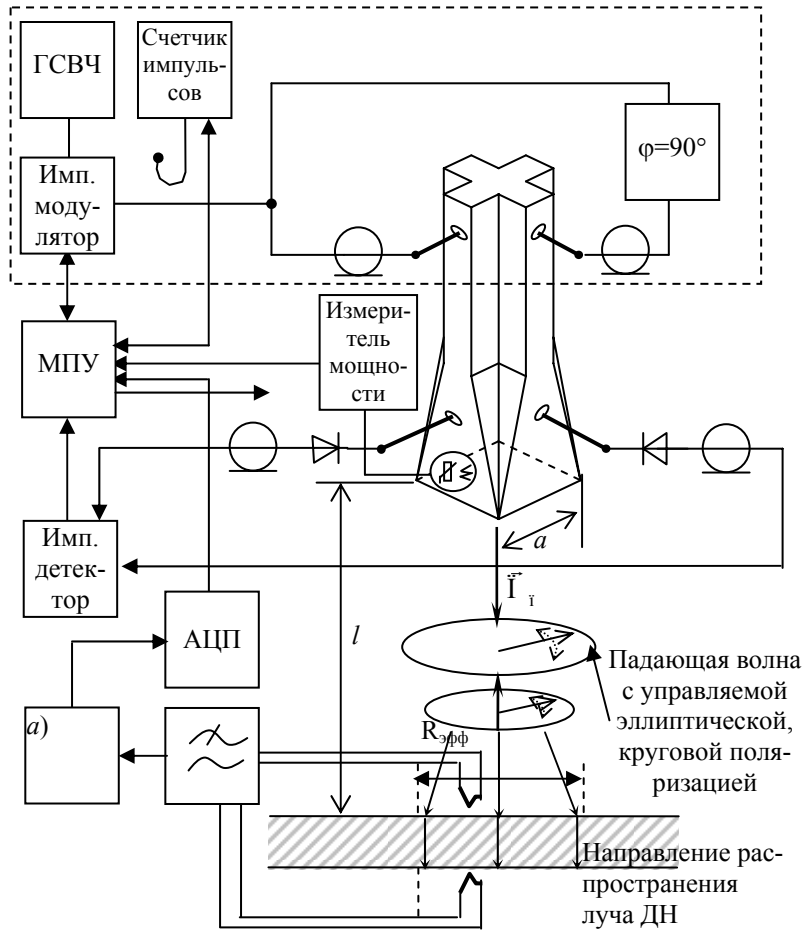


Рис. 1 Структурная схема установки реализации способа

Глубина проникновения поля плоской волны в материал с потерями определяется по известному выражению [4] для немагнитных материалов:

$$\Delta = \frac{0,225\lambda_{\Gamma}}{\sqrt{\varepsilon''_{\text{см}}}}, \text{ м}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon''(W) = K_1 W$  – мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости исследуемого материала, зависящая от влажности  $W$  в объеме материала,  $K_1$  – коэффициент пропорциональности.

Минимальная толщина материала должна обеспечивать полное поглощение СВЧ поля преломленной плоской волны. Учитывая, что волна затухает в  $e = 2,718\dots$  раз на пути в  $\Delta$ , примем, что  $b_{\text{min}} \geq 5\Delta$ .

Эффективный радиус зоны излучения антенны  $R_{\text{эф}}$  в данном случае будет определяться геометрическими размерами  $a$  – линейным размером стороны квадратной излучающей апертуры (см. рис. 1) приемно-излучающей апертуры, расстоянием  $l$  от антенны до плоскости материала и шириной диаграммы направленности  $\Delta\theta_{0,5}$ . В идеальном случае для «карандашной» ДН  $R_{\text{эф}} = a/2$ . Проведенные нами расчеты позволили получить  $R_{\text{эф}} = 0,5a + l\tan\Delta\theta_{0,5}$ . Направление затухания любого луча в преломленной ДН нормально, поэтому при определении объема взаимодействия можно считать, что по глубине проникновения электромагнитной волны в материале эффективный радиус зоны излучения антенны  $R_{\text{эф}} \approx \text{const}$ .

Количество тепла, поглощаемое материалом

$$Q = P_{\text{пр}} t_{\text{н}} = C_V(W) m(W) \Delta T, \quad (2)$$

где  $P_{\text{пр}}$  – мощность преломленной волны;  $t_{\text{н}}$  – время нагрева материала;  $C_V$  – объемная теплоемкость влажного материала, определяемая по формуле Оделевского [2];  $m$  – масса взаимодействующего вещества  $m = \rho V_{\text{вз}}$ ;  $\rho$  – плотность исследуемого материала, определяемая через плотности свободной влаги и обезвоженного материала [2].

Мощность поглощаемой 1 м<sup>3</sup> в 1 с энергии активных поляризационных потерь

$$P_{\text{пр}} = \frac{\omega}{2} \varepsilon_0 \varepsilon''(W) \left[ \frac{E_{\text{ср}}}{\varepsilon'_{\text{н}}} \right]^2, \quad (3)$$

где  $E_{\text{ср}} \approx \frac{E_m}{2}$  – средняя напряженность электрического поля преломленной волны внутри материала,  $E_m = 1,41 \cdot \sqrt{Z_0 P_{\text{пад}}}$  – мощность, переносимая волной,  $Z_0$  – волновое (характеристическое) сопротивление свободного пространства, равное 377 Ом.

Согласно граничным условиям третьего рода [5], из которых вытекает баланс подвода и отвода теплоты, при наступле-

нии теплового баланса количество вносимого тепла  $Q_{\text{вн}}$  будет равно количеству тепла, излучаемому в окружающую среду  $Q_{\text{изл}}$ . Изменение температуры материала, при которой наступает тепловой баланс, будет в том числе зависеть не только от параметров видеоимпульсов, но и от их количества  $N$  и влажности материала [6]:  $\Delta T = \Phi(N, W)$ . При постоянном градиенте изменения температуры по площади излучения, ограниченной  $R_{\text{эф}}$ , в стационарном режиме можно считать [5], что

$$Q = -\lambda \text{grad}T(S t_{\text{н}}), \quad (4)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности.

Определяя количество вносимого тепла  $Q_{\text{вн}}$  по (2) и учитывая равенство (4), в котором градиент температуры материала  $\text{grad}T$  экспериментально определяем, можно найти коэффициент теплопроводности  $\lambda$ .

Таким образом, в импульсном режиме количество длительных греющих импульсов  $N$  при малой толщине измеряемой среды по моменту наступления теплового равновесия будет пропорционально коэффициенту теплопроводности исследуемого материала.

Рассматривается возможность определения поглощающих свойств так называемых киральных покрытий. С целью учета погрешности измерений при влиянии анизотропии киральных структур, свойства которых не инвариантны поляризации волны, возможно управление поляризацией падающей электромагнитной волны тестирующего поля.

#### Список литературы

- 1 Котов, И.О. Микроволновые фазерные измерения комплексной диэлектрической проницаемости капиллярно-пористых материалов / И.О. Котов, П.А. Федюнин // Труды ТГТУ : сборник научных статей молодых ученых и студентов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – Вып. 20. – 320 с.
- 2 Микроволновая термовлагодетрия / П.А. Федюнин, Д.А. Дмитриев, А.А. Воробьев, В.Н. Чернышов. – М. : Машиностроение, 2004. – С. 230.
- 3 Положительное решение на выдачу патента № 2004115898, МПК<sup>7</sup> G 01 N 22/04. СВЧ способ измерения поверхностной влажности твердых материалов, влажности по объему взаимодействия, нормального к поверхности градиента влажности и устройство его реализации / Тетушкин В.А., Федюнин П.А., Дмитриев Д.А., Чернышов В.Н. (РФ). – № 2004115898/09 ; заявл. 25.05.04 ; опубл. 10.11.05, Бюл. № 4.
- 4 Неразрушающий контроль и диагностика : справочник / В.В. Клюев, Ф.В. Соснин, В.Н. Филинов и др. ; под ред. чл.-кор. РАН, проф. В.В. Клюева. – М. : Машиностроение, 1995. – 408 с.
- 5 Карташов, Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел / Э.М. Карташов. – М. : Высшая школа, 2001. – 550 с.
- 6 Берлинер, М.А. Измерение влажности в диапазоне СВЧ / М.А. Берлинер. – М. : Энергия, 1973.

*Л.И. Курлапов, А.Ю. Скорняков*

*Казахский национальный университет им. аль-Фараби (г. Алматы)*

#### **АНАЛИЗ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НА ОСНОВЕ ПОДСЧЕТА ПРОИЗВОДСТВА ЭНТРОПИИ**

Расчеты скорости производства энтропии в процессе теплопроводности используются для выбора оптимального решения уравнения теплопроводности. Для этого используется сравнение приращения энтропии, рассчитанное по известной формуле Гиббса с рассчитанным значением, которое получено путем интегрирования скорости производства энтропии по времени и по пространству для всего нестационарного процесса релаксации начальной неоднородности температуры.

В соответствии с постулатом об обратимой достижимости реальный необратимый процесс теплопроводности заменяется набором обратимых процессов, к которым применимо определение Клаузиуса для приращения энтропии через приведенную теплоту. Это позволяет вычислить приращение энтропии, соответствующее необратимому переходу из начального состояния в конечное состояние, как разности значений энтропии в этих двух состояниях (формула Гиббса). С другой стороны, это же приращение энтропии должен давать расчет, основанный на интегрировании балансового соотношения для энтропии. Такой способ применен для простых систем. В частности, для двух металлических образцов в виде кубиков, имеющих разную начальную температуру и приведенных в тепловой контакт в адиабатной оболочке, применено решение нестационарного уравнения теплопроводности методом Фурье. Скорость производства энтропии определена по формуле термодинамики необратимых процессов. Интегрирование этой скорости сравнивается с расчетом по формуле Гиббса. Результаты говорят о том, что при малом числе членов ряда в решении методом Фурье наблюдается существенное различие двух результатов.

*С.Н. Маковеев, Е.А. Нистратова, Ю.С. Липовских*

ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

#### **МОДЕЛИРОВАНИЕ МАССОПЕРЕНОСА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ И КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК**

Разработанная модель пульсирующего сердца – модель со сложными полифункциональными и мультивариантными описаниями регуляторных процессов, отображающая нервные и гуморальные механизмы регуляции. Она создана на основе концепции, согласно которой целью центральной регуляции сердечно-сосудистой системы (ССС) – целостной системы, со-

стоящей из автономных локальных подсистем – является уравнивание напряжений, возникающих в этих подсистемах в ходе адаптации к внешним условиям. Модель отличается рассмотрением целостной сердечно-сосудистой системы с замкнутым кругом кровообращения, правильно отражает пульсовые колебания в системе, являясь RLC-моделью (учитывает соответственно сопротивление, эластичность, инерционность). Также рассматриваются такие параметры, как сила тяжести, давление тканей и давление в полостях организма, что позволяет применять данную модель для исследования функционирования сердечно-сосудистой системы в условиях изменения положения тела, при переменных ускорениях, при локальном изменении внутрисосудистого давления и для детального исследования венозной гемодинамики.

В данной версии модели, как и в ее прототипе, циклическая деятельность сердца рассматривается как чередование систол и диастол. Уникальным является применяемая модель клапана, позволяющая описать регургитацию – течение крови через клапан в обратном направлении, наблюдаемое в реальном сердце непосредственно перед закрытием клапана.

Для описания сосудистой системы построена камерная модель. По структуре она имеет вид камерной цепи, упрощенно отображающей структуру сосудистого русла человека. К этой цепи подключается модель сердца, которая в форме, совместимой с описанием сосудистой системы, описывает деятельность желудочков.

Отображение сердца только желудочками обусловлено определяющей ролью желудочков в обеспечении насосной функции сердца, соотношениями ограничения вычислительного объема модели, а также основным направлением интересов медицины и физиологии.

Характерной чертой описания сосудистой системы является стремление к минимальности – при построении модели не вводились лишние элементы.

Как видно, в данной модели тесно объединяются представления о сердечной камере как о камере с мышечными стенками, описание гетерометрической саморегуляции сердца; в явном виде отображен ряд свойств сердца: эластичные и вязко-стные характеристики сердечной мышцы, структурные характеристики миокарда, геометрические характеристики сердца, сократительные свойства миокарда. Кроме того, разработанная модель сердца построена «изнутри», т.е. на основе элементарных и дифференциальных физиологических и физических закономерностей. Это придает модели более ясный смысл, позволяет лучше понять функционирование моделируемого объекта.

Модель сердца геометрически обоснованно отображает изменение объема сердца в течение сокращения, правильно связывает между собой механику сердечной мышцы и гемодинамику.

Разработанная математическая модель сердца может применяться в клинических и научных исследованиях. Свойства и функции модели имеют физиологическую интерпретацию. На основе математического описания модели создано программное обеспечение для имитации работы как здорового сердца, так и различных видов патологии.

Алгоритм решения реализован в виде двух вариантов компьютерных программ: для изолированного сердца и сердечно-сосудистой системы с пульсирующим сердцем.

Разработанное программное обеспечение позволяет в диалоговом режиме

- задавать или изменять свойства полостей сердца (и сосудистых резервуаров);
- выбирать функции для вывода на экран результатов моделирования;
- задавать начальные условия, время наблюдения и т.д.

Для заданных параметров и начальных значений программа строит по модели волновые формы давлений, объемов и потоков в выбранных участках ССС, а также рассчитывает ударный и сердечный выброс на каждом цикле сокращения сердца.

Результаты работы представляют весьма обширный интерес как для практических приложений в физиологии и медицине, так и для теоретических исследований, включающих дальнейшее развитие модели и интеграцию ее с моделями других систем организма человека.

*Д.В. Минин, Е.Б. Швецова*

ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

### **ВЕКТОР РАЗВИТИЯ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ КОМПЛЕКСОВ\***

Представление самых известных программно-аппаратных комплексов анализируется по степени усложнения и расширения программного обеспечения: аппаратно-программный комплекс «Резервы здоровья», компьютерная система ValeoTest, программно-аппаратный комплекс «АКДО-ИПС-Диспанс», автоматизированное рабочее место врача-педиатра «Здоровый ребенок».

Аппаратно-программный комплекс «Резервы здоровья» осуществляет диагностику и мониторинг основных функциональных, физических и психологических параметров здоровья человека в их взаимосвязи с индивидуально действующими на него основными факторами: образом жизни, традиционным питанием, окружающей средой. В его состав входят блоки «Регистрационная карта» и «Общие данные», «Первый осмотр» и «Физическое развитие», «Нервно-психическое развитие» и «Функциональное состояние органов и систем».

Достоинством этого комплекса является единый процесс, оптимально объединяющий диагностические и корректирующие методики для осуществления высокоэффективного лечения, реабилитации и укрепления здоровья. Недостатком является наличие большого количества отдельных разнородных программ, а также диапазон измерений от 7 лет, что обуславливает неполноту собираемой информации.

ValeoTest – предназначен для комплексной экспресс-диагностики и мониторинга основных функциональных, физических и психологических параметров здоровья человека в их взаимосвязи с индивидуально действующими на него основными факторами: образа жизни, традиционного питания, окружающей среды. Его основой являются блоки «Регистрационная

---

\* Работа выполнена под руководством д-ра техн. наук, профессора С.В. Фролова

карта» и «Общие данные», «Первый осмотр» и «Физическое развитие», «Нервно-психическое развитие» и «Функциональное состояние органов и систем», «Резистентность». Добавление блока «Резистентность» позволило делать выводы о силе иммунной системы и прогнозировать частоту последующих заболеваний. Это дает возможность их предотвращения.

Достоинством системы является использование апробированных на практике и хорошо зарекомендовавших себя неинвазивных методов функциональной диагностики. Совокупность этих измерений дает достаточно полное представление о функциональном состоянии организма обследуемого с учетом особенностей образа жизни. К недостаткам можно отнести то, что комплекс рассчитан на детей только школьного возраста и на взрослых людей, что не позволяет увидеть предысторию заболеваний и динамику их развития.

«АКДО-ИПС-Диспанс» – программно-аппаратный комплекс, служит для автоматизации медико-технологического процесса при массовом комплексном многопрофильном диспансерном обследовании детей и подростков в возрасте от 3 до 18,5 лет. Архитектура комплекса представлена блоками «Регистрационная карта» и «Общие данные», «Первый осмотр» и «Группы здоровья», «Физическое развитие» и «Нервно-психическое развитие», «Функциональное состояние органов и систем» и «Резистентность». Появление блока «Группы здоровья» позволяет составить обобщенную картину здоровья пациента. Это позволяет составить и провести сразу комплекс укрепляющих и оздоравливающих процедур.

Программное обеспечение комплекса помогает выявить отклонения в состоянии здоровья по всем основным формам детской патологии. Кроме того, обеспечивается оценка риска инфицирования ВИЧ ребёнка. Недостатком является то, что комплекс – это набор отдельных программ: АКДО, администрирование баз данных, оценка физического развития и питания, программное обеспечение 12-канального компьютерного кардиографа «ВАЛЕНТА+», а также то, что диапазон измерений составляет от 3 до 18,5 лет – это не позволяет предотвратить развитие заболеваний и патологий.

Автоматизированное рабочее место врача-педиатра «Здоровый ребенок» – программно-аппаратный комплекс, предназначенный для расширения возрастного диапазона от 0 до 3 лет. В его состав входят блоки «Регистрационная карта» и «Общие данные», «Дородовый патронаж» и «Патронаж новорожденного», «Первый осмотр» и «Группы риска», «Физическое развитие» и «Нервно-психическое развитие», «Функциональное состояние органов и систем» и «Резистентность». Внесение блоков «Дородовый патронаж» и «Патронаж новорожденного», «Группы риска» позволило узнать предысторию пациента, спрогнозировать возможные заболевания. Это дает возможность предотвратить развитие патологий.

Его главное достоинство – проведение обследований детей в возрасте до трех лет, что позволяет иметь полную информацию о ребенке, знать всю предысторию заболеваний и предотвратить развитие патологий.

Таким образом, вектор развития направлен с аппаратно-программного комплекса «Резервы здоровья» до автоматизированного рабочего места врача-педиатра «Здоровый ребенок» через компьютерную систему ValeoTest и программно-аппаратный комплекс «АКДО-ИПС-Диспанс» за счет расширения программного обеспечения.

*М.М. Мордасов, М.М. Козадаева*

ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

### **ОБЪЕМОМЕТРИЧЕСКИЙ ПУЗЫРЬКОВЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТЕЙ**

Информация о вязкости жидкостей широко используется в лабораторной и производственной деятельности. На многих производствах в различных отраслях промышленности по вязкости  $\eta_{ж}$  судят о качестве как выпускаемой продукции, так и о ходе технологического процесса. Во многих случаях, например, в химической, нефтехимической, лакокрасочной и др. отраслях промышленности, требуются высоконадежные, дешевые, простые по конструкции, пожаро- и взрывобезопасные вискозиметры. Наиболее полно таким требованиям отвечают вискозиметры, реализующие пневматические методы измерения.

Проведен анализ пневматических методов контроля вязкости. Выявлены их основные недостатки, определены диапазоны целесообразного применения. Из большого количества пневматических методов можно выделить группу пузырьковых.

В результате проведенных экспериментальных исследований процессов образования, роста и отрыва пузырьков газа в вязкой жидкости были выявлены закономерности, на основании которых разработаны новый метод измерения вязкости и устройство для его реализации.

При контроле вязкости разработанным методом используется малый объем жидкости, кроме этого чувствительные элементы измерительного преобразователя не имеют контакта с контролируемым веществом.

Осуществлено теоретическое описание метода, проведена его экспериментальная проверка, определены точностные характеристики.

Для реализации разработанного метода контроля вязкости необходимо:

- на вход газоподводящей трубки, погруженной в контролируемую жидкость, подать газ с постоянным расходом  $Q$ ;
- сформировать заданное количество пузырьков газа  $n$ ;
- измерить объем  $V$  газа, затраченный при формировании заданного количества газовых пузырьков;
- определить вязкость по измеренному значению объема газа  $V$ , поступившего на вход газоподводящей трубки и связанного с контролируемым параметром зависимостью

$$\eta_{ж} = kV^{4/3},$$

где  $k = 0,189n^{-4/3}\rho_{ж}Q^{-1}$  – коэффициент пропорциональности.

Разработанный метод может быть модифицирован. При этом измеряют количество пузырьков газа  $n$ , образованных из

заданного объема газа  $V$ . Уравнение, связывающее вязкость с количеством газовых пузырьков, имеет вид

$$\eta_{\text{ж}} = k_1 n^{-4/3},$$

где  $k = 0,189V^{-4/3} \rho_{\text{ж}} Q^{-1}$  – коэффициент пропорциональности.

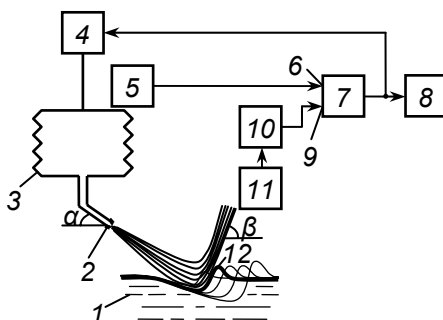
Было установлено, что при реализации пузырькового метода для подачи постоянного расхода газа целесообразно использовать микродозаторы, например, перистальтического типа. Кроме этого, измерение количества пузырьков газа удобно осуществлять микроманометром конденсаторного или микрофонного типа.

*М.М. Мордасов, А.П. Савенков*

ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

### **ПНЕВМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ВЯЗКОСТИ**

Все традиционные методы измерения вязкости предполагают наличие контакта чувствительного элемента с контролируемой жидкостью. В настоящее время разрабатываются бесконтактные неразрушающие методы контроля вязкости, базирующиеся на силовом воздействии струи газа на поверхность жидкости [1, 2]. Ниже приведено описание устройства, реализующего один из таких методов. Предлагаемое устройство удобно использовать при контроле вязкости жидкостей с высокими адгезионными свойствами. Для работы устройства не требуется централизованной линии питания сжатым воздухом.



**Рис. 1 Структурная схема устройства  
для бесконтактного неразрушающего контроля вязкости**

На рис. 1 представлена структурная схема устройства для бесконтактного неразрушающего контроля вязкости. Пуск устройства осуществляют подачей на его вход питания. На выходе триггера 7 формируется сигнал нулевого уровня  $U_7 = 0$ , под действием которого исполнительный механизм 4 осуществляет растяжение сильфона 3 с постоянной скоростью  $w_4$ . В момент времени  $t_1$  шток исполнительного механизма 4 достигает крайнего верхнего положения и на выходе датчика 5 формируется сигнал единичного уровня  $U_5 = 1$ . При поступлении сигнала  $U_5 = 1$  на вход 6 триггера 7 на его выходе устанавливается сигнал  $U_7 = 1$ . Под действием этого сигнала исполнительный механизм 4 сжимает сильфон 3 с постоянной скоростью, равной по модулю  $w_4$ . На выходе сопла 2, расположенного над поверхностью жидкости 1 под углом  $\alpha$  к ней, формируется струя воздуха, деформирующая поверхность жидкости и приводящая к образованию волны 12. Волна 12 движется по поверхности со скоростью  $w_{12}$ , зависящей в основном от вязкости  $\eta$  жидкости. В ходе экспериментов [1] было замечено, что при движении волны струя воздуха отрывается от поверхности жидкости и выходит из образованного углубления под углом  $\beta \approx \pi/2$ .

На выходе микрофона 11 присутствует сигнал  $U_{11}$  малой амплитуды  $U_m$ , соответствующий внешней акустической обстановке. В момент времени  $t_2$  волна 12 достигает положения, при котором струя воздуха воздействует на мембрану микрофона 11. На его выходе возникает сигнал  $U'_{11}$ , амплитуда которого  $U'_m \gg U_m$ . Детектор 10 формирует на выходе сигнал единичного уровня  $U_{10} = 1$ . При поступлении этого сигнала на вход 9 триггера 7 на его выходе устанавливается сигнал  $U_7 = 0$ , под действием которого исполнительный механизм 4 осуществляет растяжение сильфона 3. Струя воздуха на выходе сопла 2 отсутствует, вследствие чего происходит восстановление поверхности жидкости в месте контакта со струей. В момент времени  $t_3$  шток исполнительного механизма 4 достигает крайнего верхнего положения, на выходе датчика 5 формируется сигнал  $U_5 = 1$ , триггер 7 переключается в единичное состояние, исполнительный механизм 4 начинает сжимать сильфон 3. Процессы сжатия и растяжения сильфона периодически повторяются.

При постоянной скорости  $w_4$  штока исполнительного механизма 4, ход штока  $x$  изменяется линейно. Время растяжения сильфона  $t_p = t_2 - t_1$  равно времени сжатия  $t_c = t_3 - t_2$ . Поскольку скорость  $w_{12}$  движения волны 12 зависит от вязкости  $\eta$  жидкости, то и время  $t_c$  сжатия, а, следовательно, и время  $t_p$  растяжения сильфона 3 определяются вязкостью  $\eta$ . Таймер 8 измеряет период  $T = t_c + t_p$  импульсов сигнала  $U_7$ , поступающего с выхода триггера 7. Период  $T$  является мерой вязкости  $\eta$  жидкости.

## Список литературы

1 Гализдра, В.И. Аэрогидродинамические бесконтактные способы и средства контроля физико-механических свойств жидких сред : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.13 / В.И. Гализдра. – М., 1991. – 178 с.

2 А. с. 1385032 SU, G 01 N 11/16. Устройство для измерения вязкости / В.И. Гализдра, М.М. Мордасов. – № 3915917/31-25 ; заявл. 11.07.86.

*А.П. Пудовкин, С.П. Москвитин, Н.А. Кольтюков*

ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

## МЕТОД И ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Большие перспективы по применению в различных отраслях промышленности получили многослойные материалы. Они применяются для производства деталей и оборудования предприятий химического, нефтяного, сельскохозяйственного, транспортного, энергетического и других отраслей машиностроения. К потребителям таких материалов относятся также приборостроение и радиоэлектроника.

В связи с ростом производства многослойных материалов актуальным становится вопрос контроля качества выпускаемой продукции. Основными контролируемыми параметрами многослойных материалов при этом служат соотношение толщин слоев, общая толщина получаемого материала и прочность соединения слоев. Для непрерывного контроля толщин слоев разработано достаточно методов, позволяющих их оценивать с большой точностью. Но для контроля прочности соединения слоев применяют в основном разрушающие методы, которые менее производительны и достоверны.

Разработка и создание методов и средств автоматизированного неразрушающего контроля (НК), позволяющих проводить непрерывный контроль характеристик качества многослойных материалов в процессе их производства, является важной задачей.

Для решения этой проблемы предлагаются метод и измерительная система НК прочности соединения слоев двухслойных металлических материалов в процессе их производства. Данный метод основан на определении величины электрического сопротивления контакта плакирующего слоя и основания, по которому далее проводят оценку прочности соединения слоев. Контроль прочности проводится во время холодной прокатки биметалла под действием на него импульсного электрического тока большой плотности. Схема установки, реализующий данный способ, показана на рис. 1. Сущность его заключается в следующем. Предварительно подготовленные составляющие биметалла подают в прокатную клеть 1. Генератор импульсов 2 вырабатывает импульсы электрического тока с частотой  $f = (0,07 \dots 2,5)$  кГц, которые подаются через валки 3 в зону деформации, амплитудное значение плотности тока при этом составляет  $J_m = (5 \dots 10) \cdot 10^5$  А/см<sup>2</sup> при длительности импульсов  $t_{имп} = (0,2 \dots 5) \cdot 10^{-3}$  с (рис. 1).

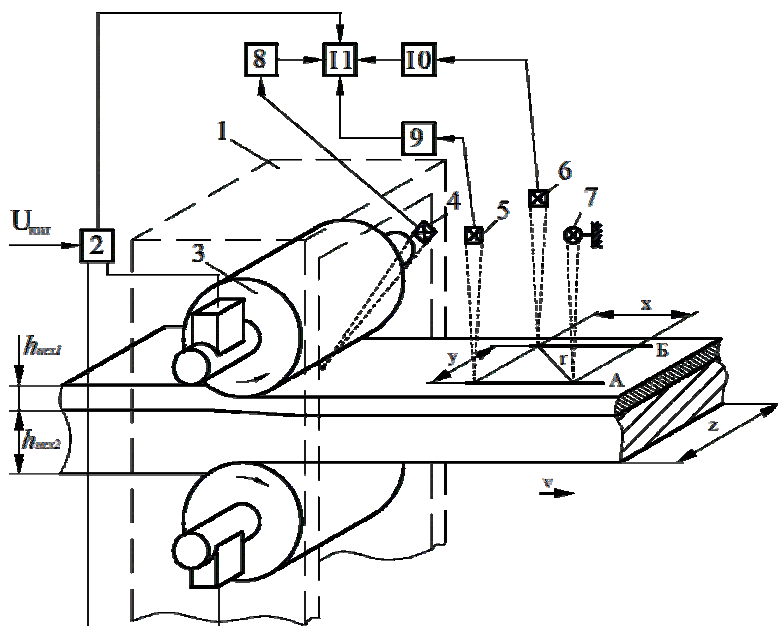


Рис. 1 Схема установки для прокатки биметалла под действием импульсного тока с последующим контролем прочности соединения слоев

Прочность соединения слоев определяют по графику (рис. 2), который предварительно получают в ходе испытаний би-

металла на прочность соединения его слоев. Для каждой партии полученного биметалла измеряют прочность соединения слоев известными разрушающими методами, предварительно измерив электрическое сопротивление участка пластической деформации.

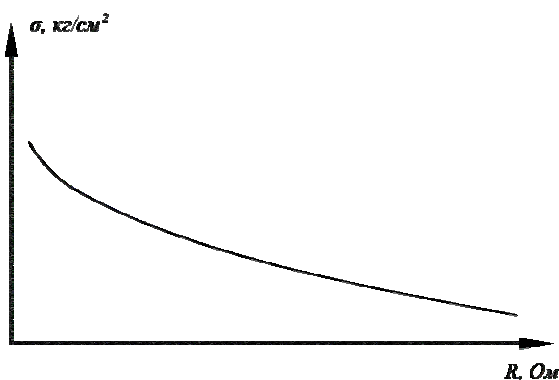


Рис. 2 График зависимости прочности соединения слоев биметалла при различных значениях электрического сопротивления контакта его слоев

Для этого измеряют первым термоприемником 4 избыточную температуру биметалла  $\Delta T$  при выходе его из зоны пластической деформации в моменты времени между импульсами электрического тока. Дополнительно биметалл нагревают точечным источником тепловой энергии 7 и измеряют вторым термоприемником 5 избыточную температуру  $T_2$  нагрева поверхности биметалла в точке, расположенной на заданном расстоянии  $x$  за точечным источником тепловой энергии по линии его движения. Затем измеряют третьим термоприемником 6 избыточную температуру  $T_3$  нагреваемой поверхности биметалла по линии параллельной линии движения точечного источника тепловой энергии на заданном расстоянии  $r$ . Информация от генератора импульсов электрического тока и термоприемников, через усилители сигналов 8, 9 и 10 поступает на микроконтроллер 11, который с учетом параметров действующего импульсного электрического тока, мощности точечного источника тепловой энергии, измеренных значений температур, расстояний между приемниками и источником энергии, заданных исходных толщин и плотностей материалов верхнего слоя и основания, степени деформации по формуле (1) вычисляет электрическое сопротивление контакта слоев биметалла:

$$R = \frac{\Delta T q \ln \left[ \frac{x T_2}{\sqrt{y^2 + x^2} T_3} \right] \frac{l b_H \varepsilon}{2} z}{T_2 J^2 t_{\text{имп}} \pi x v (\rho_1 (1 - m) + \rho_2) (\sqrt{x^2 + y^2} - x) - \frac{\varepsilon (\rho_{\text{уд1}} h_{\text{исх1}} + \rho_{\text{уд2}} h_{\text{исх2}})}{z l}}, \quad (1)$$

где  $q$  – мощность точечного источника тепловой энергии, Вт;  $y$  – расстояние от точки регистрации температуры третьим термоприемником до линии движения источника тепла, м;  $v$  – скорость движения прокатываемой полосы, м/с;  $\rho_1, \rho_2$  – плотности материалов каждого из слоев, кг/м<sup>3</sup>;  $m$  – коэффициент, учитывающий среднюю плотность биметалла в зависимости от соотношения толщин его слоев;  $\varepsilon$  – коэффициент деформации материала;  $h_{\text{исх1}}, h_{\text{исх2}}$  – исходные толщины каждого слоя, м;  $l$  – длина очага деформации, м;  $\rho_{\text{уд1}}, \rho_{\text{уд2}}$  – удельные сопротивления каждого слоя, Ом · м;  $z$  – ширина прокатываемой ленты, м;  $b_H$  – общая толщина материала на входе в валки, м.

Таким образом, внедрение в производство предложенного метода и системы контроля в процессе производства биметалла позволит значительно повысить качество многослойных материалов, производительность труда, экономический эффект за счет снижения энергетических затрат на производство и сведения к минимуму дефектной продукции.

#### Список литературы

- 1 Лихтман, В.И. Физико-химическая механика металлов / В.И. Лихтман, Е.Д. Щукин, П.А. Ребиндер. – М. : Изд-во «Наука», 1963.
- 2 Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы / Ю.В. Баранов, О.А. Троицкий, Ю.С. Аврамов, А.Д. Шляпин. – М. : МГИУ, 2001. – 844 с.
- 3 Москвитин, С.П. Исследование влияния электропластического эффекта при холодной прокатке биметаллов / С.П. Москвитин, А.П. Пудовкин // XII научная конференция ТГТУ. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – С. 38 – 40.
- 4 Пат. RU 2005117108 А. Способ бесконтактного неразрушающего контроля толщины, теплофизических свойств и пористости металлического каркаса двуслойных ленточных материалов / Ю.В. Плужников, А.В. Колмаков, А.П. Пудовкин, В.Н. Чернышев, А.П. Лаврентьев, И.Г. Горчаков, А.И. Дьяконов. – № 2005117108/28 ; заявл. 03.06.2005 ; опубл. 10.12.2006, Бюл. № 34.

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СКОРОСТИ ЗВУКА В ЧИСТЫХ ЖИДКОСТЯХ И РАСТВОРАХ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ**

С целью исследования чистых органических жидкостей и их смесей создана экспериментальная установка, позволяющая измерять скорость распространения звука при давлениях до 100 МПа и температурах 298–433 К. В установке реализуется метод непосредственного измерения времени прохождения импульса сквозь исследуемую среду. Основным элементом установки является акустическая ячейка, которая представляет собой две пьезокерамические пластины из ЦТС-19 диаметром 0,02 м и резонансной частотой 3 МГц, разделенные трубкой из нержавеющей стали. Акустическая ячейка помещена в автоклав высокого давления. Термостатирование автоклава с акустической ячейкой осуществлялось в жидкостном термостате. Поддержание заданной температуры осуществлялось при помощи прецизионного регулятора температуры РТП-8.1 с точностью 0,01 К. Температура измерялась двумя платиновыми термометрами сопротивления ПТС-10М при помощи многоканального прецизионного измерителя температуры МИТ-8.15. Показания обоих термометров сопротивления в опытах совпадали с точностью 0,01 К. Погрешность измерения температуры не превышала 0,02 К. Давление в установке измерялось грузопоршневым манометром МП-2500 класса 0,05. Максимальная погрешность измерения скорости звука с учетом ошибок отнесения по температуре и давлению не превышала 0,1 %.

Электронно-акустическая система, в состав которой входят многофункциональный измерительный комплекс УНИПРО, персональный компьютер и акустическая ячейка, работает следующим образом. При помощи управляющей программы генератором импульсов произвольной формы, входящим в состав измерительного комплекса УНИПРО, формируются пакеты синусоидальных импульсов длительностью 5 периодов и частотой заполнения 3 МГц. Частота заполнения равна резонансной частоте пьезоэлементов. Генератор посылает импульс на излучающий пьезоэлемент, установленный в акустической ячейке. Электрический сигнал преобразуется излучающим пьезоэлементом в акустический импульс. Акустический импульс, проходя сквозь исследуемую жидкость, попадает на приемный пьезоэлемент. Пьезоэлемент преобразует акустический импульс в электрический, который поступает на вход цифрового осциллографа, входящего в состав измерительного комплекса УНИПРО, информация с которого поступает на компьютер. Синхронизация осциллографа достигается при помощи синхроимпульса генератора. На мониторе персонального компьютера наблюдаются импульс, один раз прошедший сквозь исследуемую среду, и импульс, дважды отраженный от приемного и излучающего пьезоэлементов. При помощи цифрового осциллографа производилось измерение временных интервалов между импульсом, единожды прошедшим исследуемую жидкость, и дважды отраженным импульсом. Скорость звука определялась по формуле:

$$W = \frac{2L_{p,T}}{\tau} + \Delta W_{\text{волн}} - \Delta W_{\text{дифр}}, \quad (1)$$

где  $L_{p,T}$  – эффективное расстояние между пьезопреобразователями (длина акустической базы) при давлении и температуре опыта;  $\tau$  – время прохождения импульса;  $\Delta W_{\text{волн}}$  – поправка, учитывающая волноводный эффект;  $\Delta W_{\text{дифр}}$  – поправка, учитывающая дифракционный эффект.

Длина акустической базы определялась калибровкой на воде с использованием прецизионных данных о скорости звука.

На данной экспериментальной установке были выполнены измерения скорости звука в жидких n-алканах (n-гексане, n-декане, n-гексадекане) в интервале температур 298–433 К и давлениях до 100 МПа. Полученные экспериментальные данные согласуются с наиболее надежными данными других авторов в пределах суммарной погрешности экспериментов.

*А.Ю. Сенкевич*

ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

## **УЧЕТ НЕРАВНОМЕРНОГО НАЧАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗАДАЧАХ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ОБРАЗЦОВ**

При определении теплофизических свойств (ТФС) образцов из твердых теплоизоляционных материалов без нарушения их целостности тепловым методом, наиболее эффективным способом получения надежных и достоверных результатов теплофизического контроля является проведение определенного количества идентичных экспериментов. При выполнении таких многократных измерений на стадии остывания традиционно производится термостатирование, заключающееся в выравнивании температурных полей измерительного зонда и исследуемого образца до начального равномерного значения. Значительная продолжительность данного процесса существенно сказывается на производительности и точности метода неразрушающего контроля (НК).

В разработанном нами многостадийном методе [1] процесс контроля предлагается вести значительно быстрее, выбрав конечным моментом стадии остывания момент времени, при котором в исследуемом образце сохраняется остаточное температурное поле от предыдущего нагрева. Решена задача определения функции пространственного распределения температуры в образце и его учета в качестве начального в расчетных зависимостях метода для любой последующей стадии нагрева или остывания.



Данный подход может быть использован и для других задач НК ТФС.

Во-первых, при определении температурной зависимости ТФС, используя предложенный нами подход к учету неравномерного начального температурного поля в исследуемом образце при многостадийном эксперименте, можно добиться существенного повышения производительности НК температурозависимых ТФС.

При этом в начальные моменты времени, соответствующие отдельным этапам нагрева исследуемого образца (изделия), определяются значения параметров функции начального распределения температуры для следующего этапа нагрева. Обработка получаемых термограмм и расчет ТФС на каждом этапе эксперимента производятся в соответствии с подходом, реализованным в многостадийном методе НК ТФС [1].

Найденные значения температуропроводности и теплопроводности следует относить не к средней температуре конкретного этапа нагрева, а к средней температуре рабочего (информативного) участка этого этапа, что позволяет повысить точность определения температурной зависимости ТФС.

Таким образом, повышается информативность метода (за счет измерения температурного распределения поверхности вместо температуры в одной ее точке), точность и скорость, позволяющая сократить время определения температурной зависимости ТФС в среднем в 5 ... 6 раз.

Другим применением разработанной методики может стать задача ускорения процесса проведения НК ТФС при поточном контроле теплоизоляционных изделий или материалов. В этом случае также повышается оперативность многократных измерений, но уже разных исследуемых образцов (или участков образца), за счет сокращения пассивной стадии эксперимента термостатирования зонда перед каждым последующим опытом на новом изделии. Другими словами, метод позволяет учитывать неравномерное остаточное температурное поле, сохранившееся в измерительном зонде от предыдущего измерения.

#### Список литературы

1 Чуриков, А.А. Многостадийный метод и информационно-измерительная система неразрушающего контроля теплотехнических свойств / А.А. Чуриков, А.Ю. Сенкевич // Вестник ТГТУ. – Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2002. – Т. 8, № 1. – С. 62 – 69.

*М.Ю. Серегин, Д.М. Тамбовский*

ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

### **ПРАВИЛА ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ**

Развитие вычислительной техники и появление новых более мощных процессоров, обладающих мощнейшими вычислительными возможностями, при одновременном снижении цен на системы в целом, позволяет говорить о начале нового этапа в развитии измерительной техники – эпохи компьютерных анализаторов. При этом развитие идет по нескольким путям.

Во-первых, создание и совершенствование микропроцессорных аналитических приборов, являющихся, по сути, специализированными контроллерами, приспособленными для решения задач, связанных с аналитическими измерениями. При этом часто забывают о том, что контроллер, сколь совершенным бы он ни был, не является измерительным прибором, и подключение к нему измерительных блоков зачастую является искусственным и сильно снижает возможности измерения искомого параметра. При постоянно снижающихся затратах на аппаратное обеспечение затраты на программное обеспечение контроллеров продолжают оставаться высокими и даже начинают возрастать.

В то же время широкое внедрение персональных компьютеров в научные лаборатории и производство позволяет создавать новый тип приборов – компьютерные анализаторы. Если в начале 80-х годов прошлого века стоимость персонального компьютера была многократно выше стоимости измерительного прибора, то в настоящее время цена приборов, особенно аналитических, становится выше стоимости современных вычислительных систем на базе персональных компьютеров. Эти процессы закладывают предпосылки для создания нового класса средств измерений – компьютерных анализаторов – устройств, сочетающих высокую вычислительную мощность и легкость программирования, характерную для персональных компьютеров, с высокой точностью специализированных аналитических приборов. При этом на современном этапе уже возможно создание сенсорных аналитических приборов на базе компьютерных анализаторов, способных одновременно (или с незначительными задержками) обрабатывать информацию, поступающую с десятков или даже сотен датчиков. Такие анализаторы обладают большей точностью, более высокой надежностью и за счет применения уже имеющихся средств вычислительной техники имеют более низкую стоимость, чем измерительные приборы, построенные по традиционной архитектуре. В то же время непроработанность вопросов, связанных с метрологическим обеспечением компьютерных анализаторов, зачастую снижает эффективность их использования или превращает персональный компьютер в элементарный вычислитель с возможностью простейшего сбора информации. Поэтому обобщение данных и создание методики эффективного проектирования компьютерных анализаторов является важной задачей. В качестве подхода к решению данной задачи можно сформулировать базовые правила, которые позволяют проектировать и создавать высокоэффективные компьютерные анализаторы.

Правило 1. Необходимым условием для определения состава и свойств веществ является наличие исследуемого объекта контроля и его модели.

То есть должна существовать модель, позволяющая описать объект контроля с той или иной степенью правдоподобности, и при этом модель должна быть формализована в степени достаточной для реализации алгоритма процесса измерения.

Правило 2. Достаточным условием определения состава и свойств веществ является адекватность используемой модели физическому объекту контроля с заранее заданной степенью точности, определяемой по погрешности исследуемых параметров состава и свойств веществ.

То есть модель может отображать не все возможные свойства и состояния объекта контроля, а только учитывать свой-

ства, обеспечивающие наибольший вклад в результат измерения, при этом модель может носить кусочно-непрерывный характер.

Правило 3. Необходимым условием контроля состава и свойств веществ является сравнение исследуемого сигнала о составе и свойствах вещества и программно-управляемого образцового эталонного сигнала.

Так как большая часть процессов измерения состава и свойств веществ обычно сводится к преобразованию сигнала измерительной информации в цифровую форму с последующей обработкой цифровой информации, то необходимым условием корректных измерений является возможность сравнения получаемого сигнала с некоторым изменяемым в соответствии с управляющей программой эталонным сигналом, генерируемым эталонным источником или получаемым по эталонному стандартному образцу.

Правило 4. Достаточным условием является контроль исследуемого сигнала о составе и свойствах вещества по программно управляемому эталонному сигналу со степенью точности, определяемой по погрешности исследуемых параметров состава и свойств веществ.

То есть точность определения искомых параметров является определяющей в выборе необходимой дискретизации эталонного сигнала.

Правило 5. Необходимым и достаточным условием оптимального контроля состава и свойств веществ является соответствие исследуемых параметров объекта контроля их калибровочным значениям в диапазоне контроля. Достаточным условием является контроль по образцам с нормированными характеристиками с заданной точностью, определяемой погрешностью градуировки.

Отсюда следует, что для создания эффективной системы измерения нужно не только создавать всеобъемлющую модель объекта контроля, но и разработать эффективную систему калибровки компьютерного анализатора, позволяющую обеспечить необходимую точность определения параметров состава и свойств веществ, при этом существенным является создание алгоритмов калибровки и автокалибровки компьютерных анализаторов.

Применение предлагаемых правил при проектировании и разработке компьютерных анализаторов позволяет создавать измерительные системы и измерительные приборы, обладающие высокими точностными характеристиками при наименьших затратах.

*М.Ю. Серегин, Д.М. Тамбовский*

ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

## **ПОРТАТИВНЫЕ АНАЛИТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ НА ОСНОВЕ КАРМАННЫХ ПЕРСОНАЛЬНЫХ КОМПЬЮТЕРОВ**

Активное развитие вычислительной техники и микроэлектроники приводит к появлению новых более мощных процессоров, обладающих мощнейшими вычислительными возможностями при одновременном снижении цен на них и резком снижении энергопотребления систем в целом.

В настоящее время стоимость карманных персональных компьютеров значительно снизилась и возросла их доступность, кроме того карманные персональные компьютеры (КПК) стали широко использоваться как носители деловой информации: электронные записные книжки, электронные книги, справочники, мобильные веб-браузеры и т.п.

В ближайшие годы следует ожидать активное внедрение КПК в измерительно-аналитические системы контроля производственных параметров, активное применение систем на основе КПК в экологии и медицине.

Основными преимуществами систем на основе КПК являются: малые габариты, удобство в использовании и относительно невысокая стоимость при высокой гибкости систем.

КПК, имея габариты переносного устройства, легко помещающегося в ладони, обладает вычислительными возможностями персонального компьютера, при этом существует возможность относительно свободного переноса данных с персонального компьютера на КПК и обратно. КПК обладают интерфейсами типа Bluetooth и Wi-Fi, что позволяет легко организовать обмен данными по радиоканалу с большинством современных сетей.

КПК является комплексным устройством, позволяющим хранить и обрабатывать информацию. В настоящее время основным применением КПК является использование его в качестве интеллектуальной записной книжки с возможностью записи голоса.

Создание твердотельных дисков и флэш-накопителей большой емкости позволяет предположить возможность создания экспертных систем на основе КПК.

Однако основным недостатком современных КПК, сдерживающим их применение в качестве интеллектуальных средств измерений, является низкая емкость батареи, которая не позволяет реализовать непосредственно на их базе измерительные системы.

Существует довольно ограниченное количество решений, позволяющих использовать КПК в качестве измерительного средства. Первое решение – это подключение в слот расширения КПК специализированных АЦП, по такой схеме построено несколько портативных электрокардиографов и измерителей напряжения и качества электрической энергии. Недостатком таких систем является достаточно высокая стоимость не только КПК, но и модулей расширения и их ограниченный выбор. К тому же энергопотребление такой системы возрастает достаточно сильно, что требует наличия дополнительных сменных аккумуляторов повышенной емкости, удорожает систему и снижает время непрерывной работы.

Другим решением является применение АЦП с передачей сигнала через радиointерфейс типа Bluetooth. К сожалению, на настоящее время практически нет серийно выпускаемых модулей АЦП с этим интерфейсом, однако существование боль-

шого количества контроллеров и СБИС со встроенными АЦП и радиоинтерфейсом позволяет предположить появление достаточно большого количества подобных решений в ближайшее время. Это позволит активно развивать создание измерительных систем на основе КПК, решив проблему энергопотребления.

Другой проблемой применения КПК в качестве основы интеллектуальных приборов является сложность их программирования. Так как в настоящее время существует несколько различных по командам контроллеров, на основе которых создаются КПК, то нет возможности создания приложений, исполняемых на всех КПК. Решение этой проблемы лежит в том, что основной системой, устанавливаемой на КПК, является Windows CE или Windows Mobile, поддерживающие систему dotNET Compact Framework. Поэтому создание приложений работающих на платформе dotNET Compact Framework, может быть очень перспективным. Еще одним решением может быть применение системы LABView с модулем поддержки КПК.

Таким образом, в ближайшее время следует ожидать активного появления интеллектуальных измерительных приборов на основе КПК.

*Э.В. Сысоев, А.В. Чернышов*

ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

## МЕТОД БЕСКОНТАКТНОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Точность методов бесконтактного неразрушающего контроля (НК) теплофизических свойств (ТФС) твердых материалов зависит от решения задач, связанных с учетом тепловых потерь в окружающую среду с их поверхности. Разработанные ранее такие методы имеют один общий недостаток – в процессе измерений площадь теплоотвода участка поверхности исследуемых объектов определяется приближенно, что не позволяет в полной мере компенсировать тепловые потери в окружающую среду. В связи с этим разработан новый метод бесконтактного НК ТФС материалов, позволяющий устранить вышеназванный недостаток.

Сущность метода заключается в следующем. Над исследуемым объектом помещают точечный источник тепловой энергии (лазер) и три термоприемника, сфокусированных на поверхность, подверженную тепловому воздействию. Перемещение двух термоприемников осуществляется по линии движения источника тепла (ось  $x$ ), а третьего – по линии, перпендикулярной ей и проходящей через центр пятна нагрева (ось  $y$ ), а также по параллельной оси  $x$  прямой. Регулирование величины теплового воздействия на поверхность исследуемого образца осуществляется оптическим затвором, который осуществляет частотно-импульсную модуляцию лазерного луча. Вначале определяется коэффициент  $k$ , учитывающий значения степени черноты  $\varepsilon$  поверхности исследуемого образца и прозрачности  $\beta$  окружающей среды. Далее включают источник энергии и оптический затвор с начальной минимальной частотой модуляции лазерного луча и начинают перемещение измерительной головки над исследуемым объектом с постоянной скоростью  $V$ . Затем постепенно увеличивают частоту  $F$  прерывания лазерного луча до тех пор, пока измеряемая в точке контроля  $R_1$  избыточная температура  $T_{R1}(F_i)$  не станет равной заданному значению температуры  $T_{\text{зад}}$ . При этом измеряют значение частоты  $F_1$  и значение избыточной температуры  $T(R_2)$  в точке контроля, расположенной на расстоянии  $R_2$  от центра пятна нагрева. Затем фокусируют три термоприемника в центр пятна нагрева и начинают их перемещение. Причем один термоприемник перемещают по оси  $x$  в сторону отставания от источника тепла; второй – по оси  $y$ ; третий – по оси  $x$  в сторону опережения источника тепла. При движении термоприемниками через заданное расстояние фиксируют избыточную температуру поверхности  $T_{F1}(x)_i$  и  $T_{F1}(y)_j$  соответственно по осям  $x$  и  $y$ . Перемещение осуществляют до тех пор, пока избыточная температура, измеренная термоприемниками, не станет меньше или равной чувствительности измерительной аппаратуры. При этом фиксируют расстояния  $R1_{x1}$ ,  $R2_{x1}$ ,  $R3_{y1}$ . После этого термоприемники возвращают в исходное положение. Затем, увеличив заданное значение избыточной температуры  $T_{\text{зад}}$  в два раза, повторяют вышеописанные процедуры измерения. В результате определяют значение параметра  $F_2$ , при котором выполняется вышеуказанное соотношение контролируемых избыточных температур, избыточные температуры поверхности  $T_{F2}(x)_i$  и  $T_{F2}(y)_j$  соответственно по осям  $x$  и  $y$ , а также расстояния  $R1_{x2}$ ,  $R2_{x2}$ ,  $R3_{y2}$ . А искомые ТФС определяют по следующим зависимостям:

$$a = \frac{V(R_2 - x_2)}{2 \ln \left[ \frac{T_{\text{зад}} R_1}{T(R_2) R_2} \right]};$$

$$\lambda = \frac{k \tau_{\text{имп}} q_{\text{ит}} \left( \frac{R3_{y2}(R1_{x2} + R2_{x2}) \overline{T_{F2}}}{R3_{y1}(R1_{x1} + R2_{x1}) \overline{T_{F1}}} F_1 - F_2 \right)}{2 \pi R_1 T_{\text{зад}} \left( \frac{R3_{y2}(R1_{x2} + R2_{x2}) \overline{T_{F2}}}{R3_{y1}(R1_{x1} + R2_{x1}) \overline{T_{F1}}} - 2 \right)},$$

где  $a$  и  $\lambda$  – коэффициенты температуро- и теплопроводности;  $\tau_{\text{имп}}$  – длительность одного теплового импульса;  $x_2$  – расстояние между центром пятна нагрева и проекцией точки  $R_2$  на линию движения источника тепла;  $\overline{T_{F1}}$ ,  $\overline{T_{F2}}$  – средние избыточные температуры, которые определяют исходя из показаний термоприемников.

Проведенные экспериментальные исследования разработанного метода подтвердили корректность основных теоретических выводов, положенных в его основу. Отличительной особенностью разработанного метода является то, что в нем определяются средние избыточные температуры и площади теплоотдающей поверхности исследуемого объекта при различных

мощностях теплового воздействия. Это позволяет практически полностью исключить влияние на результаты измерений тепловых потерь за счет конвективного и лучистого теплообмена поверхности исследуемого объекта с окружающей средой, что в итоге существенно повышает метрологический уровень предложенного метода.

*А.А. Уймин, Д.Ф. Низамутдинов*

Институт теплофизики УрО РАН (г. Екатеринбург)

### **АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ЛАЗЕРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕОДНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Исследования последних лет показали, что использование для физических экспериментов излучения лазеров в качестве считывающих устройств позволяет создавать принципиально новые приборы для измерения физических свойств веществ. По изменению параметров диагностирующего лазерного излучения (мощность, направление распространения, поляризация, длина волны) можно получить информацию о физических свойствах исследуемого вещества или о процессах происходящих в нем.

Нами разработана новая методика измерения теплофизических свойств твердых тел, основанная на принципах лазерной диагностики. Она сочетает в себе метод температурных волн и считывание параметров переменного температурного поля отраженным излучением зондирующего полупроводникового лазера ( $\lambda = 0,65$  мкм), включенного в схему модуляционного эллипсометра, по синхронному с полем изменению его поляризации (метод лазерной термомодуляционной эллипсометрии). Созданная на основании этой методики экспериментальная установка с пространственно распределенным приемником в виде оптоволоконного коллектора и фотодиодной линейки позволяет одновременно считывать информацию о параметрах температурных колебаний с площади  $\sim 10^{-2}$  мм<sup>2</sup>, с пространственным разрешением  $\sim 10^{-3}$  мм<sup>2</sup>. Измерение температуропроводности в локальных участках образца осуществляется фазочастотным вариантом метода Ангстрема с высокой степенью локальности ( $\sim 0,01$  мм). По своей сути эта аппаратура представляет собой новый класс измерительных приборов – теплофизический микроскоп. Применение высокочувствительной регистрирующей аппаратуры и автоматизированной методики проведения эксперимента с цифровой обработкой сигнала дает возможность получать информацию об отличиях в теплофизических свойствах локальных участков поверхности, неразличимых для других средств измерений.

Результаты экспериментальных исследований, выполненные для металлов Ni, Pd, Ir, Zr, а также сплавов железа с обычной и с субмикро- и нанокристаллической структурой показали, что разработанные методики и аппаратура позволяют определять анизотропию и неоднородности теплофизических свойств с высокой степенью локальности в широком диапазоне температур.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ.

Проект № 07-08-00750а.

*В.Н. Чернышов, Г.Н. Иванов, А.В. Чернышов*

ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

### **КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТРЕХСЛОЙНЫХ ИЗДЕЛИЙ**

Предлагается комбинированный (контактный и бесконтактный) адаптивный по энергетическим параметрам метод неразрушающего контроля многослойных (трехслойных) изделий, сущность которого заключается в следующем [1].

Для определения ТФС наружных слоев конструкции 1 над ними помещают точечный источник тепловой энергии 2 (лазер) и термоприемники 3 и 4 (рис. 1), один из которых сфокусирован в точку теплового воздействия источника, а другой – в точку поверхности этого слоя, находящуюся от центра пятна нагрева на расстоянии  $x = h_1$ , равном толщине первого слоя конструкции.

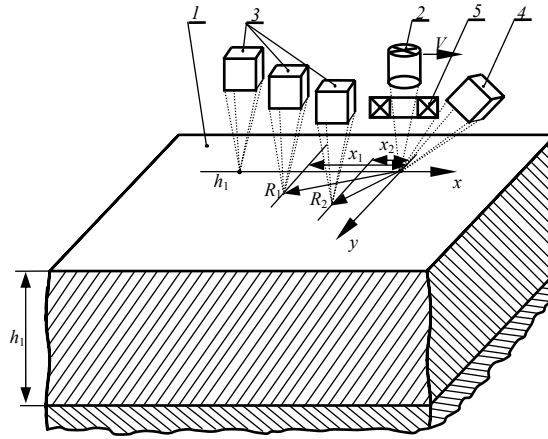


Рис. 1 Схема расположения источника тепла и термодатчиков при определении ТФС наружных слоев трехслойной конструкции

Далее начинают перемещение источника энергии 2 и термодатчиков 3 и 4 над исследуемым изделием 1 со скоростью  $V$ . При этом осуществляют широтно-импульсную модуляцию лазерного луча, прерывая его фотозатвором 5 и изменяя при этом мощность тепловых импульсов, наносимых на поверхность исследуемого тела.

Увеличение мощности тепловых импульсов  $Q_i$  осуществляют до тех пор, пока в точке поверхности  $x = h_1$  появится избыточная температура, равная  $0,1 \dots 0,2$  °К. При этом термодатчиком 4, сфокусированным в центр пятна нагрева источника, измеряют в паузах между тепловыми импульсами избыточную температуру поверхности слоя, исключая тем самым прямое попадание на термодатчик (инфракрасный первичный преобразователь температуры) части энергии лазерного луча, отраженного от поверхности исследуемого слоя.

Определив верхний допустимый предел мощности тепловых импульсов  $Q_{\max}$ , фокусируют термодатчик 3 в точку поверхности первого наружного слоя исследуемого объекта, находящуюся на расстоянии  $R_1$  от центра пятна нагрева лазера (рис. 1) и начинают перемещение источника энергии и термодатчика над исследуемым изделием со скоростью  $V$ . Расстояние  $R_1$  задают меньше величины  $h_1$ , например, можно задать  $R_1 = h_1/2$ .

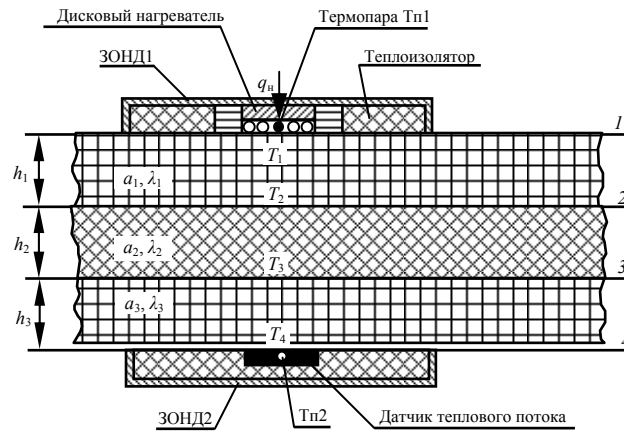
Затем увеличивают мощность тепловых импульсов в соответствии с заданными зависимостями до тех пор, пока установившееся значение избыточной температуры в точках контроля  $R_1$  и  $R_2$  станет равным двум наперед заданным значениям  $T_{\text{зад}1}$  и  $T_{\text{зад}2}$ . По найденным значениям мощностей  $Q_{x1}$  и  $Q_{x2}$ , соответствующим установившимся значениям температуры  $T_{\text{зад}1}$  и  $T_{\text{зад}2}$ , рассчитываются искомые теплофизические характеристики исследуемого материала по формулам:

$$a = \frac{V[(R_1 - R_2) - (x_1 - x_2)]}{2 \ln \frac{Q_{x1} R_2 T(R_2)}{Q_{x2} R_1 T(R_1)}}; \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{F_{\text{имп}} Q_{x1}}{2\pi T(R_1) R_1} \exp\left(-\frac{V(R_1 - x_1)}{2a}\right), \quad (2)$$

где  $F_{\text{имп}}$  – частота тепловых импульсов от источника тепла;  $R = \sqrt{x^2 + y^2}$  – расстояние от точечного источника тепла мощностью  $q$  до точки поверхности полубесконечного в тепловом отношении тела с координатами  $(x, y)$ ;  $T(R_i)$  – температура в  $i$ -й точке на расстоянии  $R$  от источника ( $i = 1, 2$ ).

Для определения ТФС второго наружного слоя конструкции измерительный зонд (лазер и термодатчик) фокусируют на поверхность второго слоя, осуществляют вышеизложенные измерительные процедуры и, определив мощности импульсов  $Q_{x1}^*$  и  $Q_{x2}^*$ , по соотношениям (1) и (2) рассчитывают искомые ТФС второго наружного слоя трехслойной конструкции (оболочки).



**Рис. 2** Схема расположения источника тепла и термодатчиков при определении ТФС внутренней среды трехслойной конструкции

Для определения ТФС материалов внутреннего слоя конструкции на каждую из наружных поверхностей полубесконечной в тепловом отношении трехслойной конструкции (рис. 2) устанавливаются по одному зонду, в плоскости контакта первого из которых расположены дисконный нагреватель ДН, а также термопара Тп<sub>1</sub>, помещенная в центр контактной плоскости дисконного нагревателя. В плоскости контакта второго термозонда расположен датчик теплового потока, а в центре круга датчика теплового потока вмонтирована вторая термопара Тп<sub>2</sub>. Нагреватель и термодатчики как первого, так и второго зондов закрыты по внешней от контактной плоскости стороне теплоизоляционным материалом типа рипора или асбеста, обеспечивая направленное движение тепловых потоков на наружную поверхность конструкции и препятствуя теплообмену в других направлениях, тем самым обеспечивая реализацию адиабатического режима нагрева.

При определении ТФС материалов внутреннего слоя конструкции включают дисконный нагреватель ДН и осуществляют подвод к поверхности конструкции удельного теплового потока через круг до тех пор, пока на противоположной поверхности конструкции появится тепловой поток. Измеряют при этом величину установившегося теплового потока  $Q_{x3}$ , а также температуру в плоскостях 1 и 4 (рис. 2) с помощью термодатчиков Тп<sub>1</sub> и Тп<sub>2</sub>.

Искомый коэффициент теплопроводности внутреннего слоя конструкции определяется по соотношению

$$\lambda_2 = \frac{q_x h_2}{(T_2 - T_3)} = \frac{q_x h_2}{\left( T_1 - q_x \frac{h_1}{\lambda_1} \right) \left( T_4 - q_x \frac{h_3}{\lambda_3} \right)}. \quad (3)$$

Для определения коэффициента температуропроводности внутреннего слоя конструкции используем аналитическое решение [2], описывающее распределение температуры по толщине  $h_2$  слоя материала и во времени  $\tau$  при использовании модели полупространства и имеющей вид:

$$T_2 - T_3 = \Delta T(h_2, \tau) = \frac{2q_x}{\lambda} \sqrt{a_2} \operatorname{ierfc}\left(\frac{h_2}{2\sqrt{a_2\tau}}\right). \quad (4)$$

Имея информацию о  $\lambda$  и  $q_x$  и используя известные подробные таблицы для определения функции кратного интеграла вероятности  $\operatorname{ierfc} z$ , численным методом из выражения (4) легко определить искомый коэффициент температуропроводности  $a_2$ .

Отличительной особенностью созданного метода и реализующей его измерительной системы является адаптация энергетических параметров теплофизического эксперимента, обеспечивающего полную гарантию сохранения целостности исследуемых объектов с высокой точностью и достоверностью получаемых результатов.

#### Список литературы

1. Пат. 2245538 РФ С1, G 01 N 25/18. Способ неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов многослойных конструкций / Чернышов А.В. – опубл. 27.01.05, Бюл. № 3.
2. Козлов, В.П. Двумерные осесимметричные нестационарные задачи теплопроводности / В.П. Козлов ; под ред. А.Г. Шашкова. – Минск : Наука и техника, 1986. – 392 с.

## **МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ НАДЕЖНОСТЬ СРЕДСТВ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ С УЧЕТОМ ВЛАЖНОСТИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

Метрологическая надежность (МН) является характеристикой качества измерительных средств (ИС), определяющей их свойство сохранять во времени метрологические характеристики в пределах установленных норм при эксплуатации в заданных режимах и условиях использования. В общем потоке отказов ИС доля метрологических отказов составляет, по разным оценкам, от 40 до 100 % [1].

Особенность метрологических отказов измерительных средств состоит прежде всего в скрытом постепенном характере их проявления. Такие отказы не удастся описать методами классической теории надежности (экспоненциальным законом, законом Пуассона). Поэтому для оценки показателей МН приходится использовать другие математические методы [2]. Кроме того, в реальных условиях эксплуатации ИС подвергается воздействию окружающей среды. Продолжительность этих воздействий ускоряет процесс старения ИС, сопровождающийся ухудшением их метрологических характеристик.

Разработка методов оценки МН средств теплофизических измерений (ТФИ) с учетом воздействия внешних влияющих факторов является задачей, решение которой позволит потребителю более точно определить МН на любой момент времени их эксплуатации в реальных условиях, правильно выбрать сроки проверок и профилактических работ.

Для решения задачи оценки МН разработан метод аналитико-вероятностного прогнозирования состояния метрологических характеристик и показателей метрологической надежности измерительных средств [3]. Недостатком метода, существенно сокращающим возможности его использования, является неучет влияния внешних факторов на параметры комплектов элементов ИС. Поэтому представляется целесообразным оценка показателей МН при эксплуатации ИС в условиях, отличающихся от лабораторных. В качестве определяющего внешнего фактора рассматривается влажность окружающей среды.

Скорость изменения метрологической характеристики во времени зависит от условий эксплуатации средств ТФ. Для выявления влияния условий эксплуатации на параметры процесса изменения во времени метрологической характеристики ИС требуется определить зависимости скорости изменения параметров комплектующих элементов ИС во времени от внешних влияющих факторов (таких, как температура, влажность).

Исходными данными при этом могут быть справочные значения, описывающие скорость старения комплектующих элементов при нормальных условиях и экспериментально определяемые параметры законов ускоренного старения. Проведенный анализ показал, что изменение параметров элементов обусловлено как параметрическими, так и структурными изменениями. Параметрические изменения обусловлены влиянием свойств внешней среды на параметры материалов компонентов (проводимость, диэлектрическая постоянная и т.д.). Структурные изменения обусловлены физико-химическими процессами, протекающими в материалах с течением времени (диффузия, коррозия, гидролиз и т.д.), т.е. они описывают старение элементов. При длительном подвергании элементов повышенной влажности окружающей среды скорость старения возрастает. Количественно ускоренное старение характеризуется коэффициентом ускорения и описывается уравнением Холлберга – Пека [4].

Использование в процедуре статистического моделирования математических моделей элементов позволяет оценить метрологическую надежность исследуемых ИС с учетом влажности окружающей среды.

### Список литературы

- 1 Фридман, А.Э. Теория метрологической надежности средств измерений / А.Э. Фридман // Измерительная техника. – 1991. – № 11. – С. 3–10.
- 2 Новицкий, П.В. Динамика погрешностей средств измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф, В.С. Лабунец. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990 – 192 с.
- 3 Мищенко, С.В. Метрологическая надежность измерительных средств / С.В. Мищенко, Э.И. Цветков, Т.И. Чернышова. – М. : Машиностроение, 2001. – 218 с.
- 4 D. Stewart Peck. Comprehensive Model for Humidity Testing Correlation // 24th Annual Proceedings of the International Reliability Physics Symposium. – IEEE, 1986. – P. 44–50.

*А.А. Чуриков, Г.В. Шишкина*

## **ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА**

Предложена методика определения параметров измерительного устройства, исследуемого образца, мощности нагрева и времени проведения теплофизического эксперимента, обеспечивающих адекватность исходной модели реальной конструкции измерительного устройства. Разработанная методика позволила изготовить такое измерительное устройство, которое обеспечило проведение контроля теплофизических свойств (ТФС) исследуемого образца с минимально возможной методической погрешностью.

Измерительное устройство представляет собой трехслойную систему: пластина из исследуемого материала контактиру-

ет с одной стороны с пакетом из двух эталонных материалов. Между эталонными пластинами находится плоский электронагреватель. В обоих эталонных образцах на определенных расстояниях от нагревателя расположены датчики температуры. Таким образом, в данном измерительном устройстве отсутствует прямой контакт исследуемого материала с датчиками температуры и нагревателем, что позволяет исследовать и химически агрессивные, и влагонасыщенные материалы. Чтобы избежать применения сложного и громоздкого термостатирующего оборудования, предложено в измерительном устройстве на внешних границах использовать специальные системы тепловой защиты, поддерживающие адиабатические условия, что отражено в его математической модели.

Из анализа расчетных зависимостей метода получена целевая функция вида:

$$\eta(g, k) = \frac{\sqrt{k} \cdot \sqrt{\operatorname{cth}^2(\sqrt{kg}) + \operatorname{cth}^2(\sqrt{g})} \cdot k}{(\sqrt{k} \cdot \operatorname{cth}(\sqrt{g}))' \cdot \operatorname{cth}(\sqrt{kg}) - \sqrt{k} \cdot \operatorname{cth}(\sqrt{g}) \cdot (\operatorname{cth}(\sqrt{kg}))'} \cdot \frac{1}{\sqrt{g}},$$

где  $g = ph^2/a$  – безразмерный параметр;  $p$  – параметр преобразования Лапласа;  $h$  – толщина исследуемого образца;  $a$  – температуропроводность исследуемого материала.

Эта функция принимает минимальное значение при определенной оптимальной величине параметра  $g_{\text{опт}}$ . Это значение оптимально с точки зрения определения ТФС исследуемого материала с минимальной погрешностью, а это, в свою очередь, позволяет рассчитать конкретные параметры измерительного устройства и теплофизического эксперимента: мощность источника тепла  $Q$ , толщину эталонного образца  $h$ , толщины верхнего и нижнего эталонных образцов  $L_3$  и  $L_1$ , расстояния до плоскостей расположения датчиков температуры  $l_3$  и  $l_1$ .

Предлагаемая методика была практически реализована при исследовании ТФС различных материалов. Чтобы обеспечить наименьшую погрешность определения ТФС, параметры эксперимента выбираются для заданного диапазона контролируемых ТФС. Были определены следующие численные значения рассматриваемых параметров.

Толщина исследуемых образцов  $h = (3 \dots 5) \cdot 10^{-3}$  м; материал верхнего эталонного образца – ситалл ( $a_3 = 7,83 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $\lambda_3 = 1,72 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ ); материал нижнего эталонного образца – полиметилметакрилат ( $a_1 = 1,1 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $\lambda_1 = 0,179 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ ). Оптимальные геометрические и режимные параметры теплофизического эксперимента для различных диапазонов ТФС исследуемых материалов представлены в таблице.

#### Оптимальные параметры измерительного устройства и эксперимента

| ТФС исследуемых материалов  | Оптимальные параметры измерительного устройства и эксперимента |                      |                      |                      |          |
|---|--|----------------------|----------------------|----------------------|----------|
|   | $L_3 \cdot 10^3$ , м   | $l_3 \cdot 10^3$ , м | $L_1 \cdot 10^3$ , м | $l_1 \cdot 10^3$ , м | $Q$ , Вт |
| $a_{\text{и}} = (0,8 \dots 3,5) \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$<br>$\lambda_{\text{и}} = (0,05 \dots 1,35) \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ | 6,5  | 3,2                  | 3,8                  | 1,6                  | 2,5      |
| $a_{\text{и}} = (3,5 \dots 6,5) \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$<br>$\lambda_{\text{и}} = (1,35 \dots 2,65) \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ | 4,5  | 2,15                 | 2,6                  | 1,12                 | 15       |
| $a_{\text{и}} = (6,5 \dots 8) \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$<br>$\lambda_{\text{и}} = (2,65 \dots 4) \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$      | 2,5  | 1,12                 | 1,5                  | 0,72                 | 25       |

Разработан алгоритм проведения процесса измерения ТФС исследуемого материала с применением измерительно-вычислительного комплекса на базе персонального компьютера.

**В.В. Шангин, А.А. Смотрицкий, Д.В. Волосников,  
А.А. Старостин**

Институт теплофизики УрО РАН (г. Екатеринбург)

#### УСТРОЙСТВО ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЯ ЛЕТУЧИХ ПРИМЕСЕЙ В МАСЛАХ

Загрязнение масел энергетического оборудования летучими примесями (наиболее опасной из которых является вода) вызывает непропорционально сильное снижение качества масла. В этой связи, востребованы средства быстрого контроля качества масел в производственных условиях.

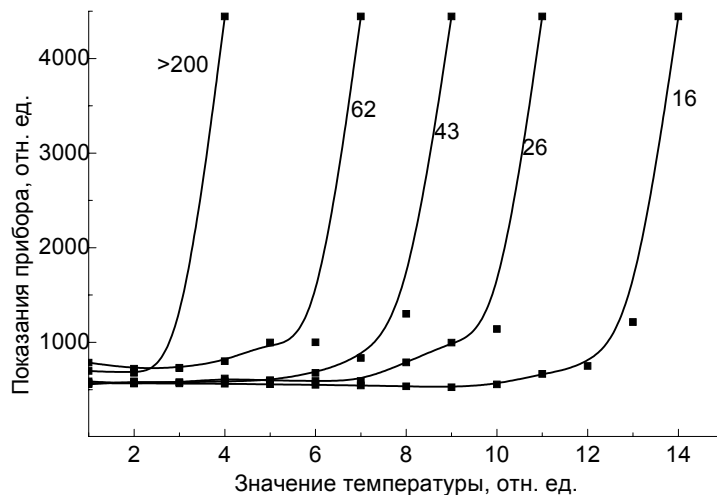
Методы косвенного контроля летучих примесей в маслах состоят в отслеживании некоторого физико-химического свойства среды, изменяющегося известным образом при изменении состава. Как правило, соответствующие приборы используют для анализа значительные объемы вещества, требуют привязки к лабораторным условиям, не имеют достаточного быстродействия.

Наша разработка основана на методе управляемого импульсного нагрева зонда, как информативном инструменте контроля состояния среды. Тепловое воздействие на вещество ограничено временем 1–10 мс в объеме менее 1 мм<sup>3</sup>. Действие уст-



ройства состоит в определении времени релаксации импульсно перегретого зонда в исследуемой среде при определенном алгоритме изменения параметров входного сигнала. Эти параметры подбираются таким образом, чтобы при приближении к заданному «опасному» уровню содержания примеси результаты изменялись на порядок величины (рис. 1). Испытанию подвергается вещество в не вполне обычном (в высокоперегретом) состоянии. В таких условиях опыта удается сформировать сильный сигнал-отклик на появление в исходно сухом масле летучего компонента – влаги, воздуха, продуктов окисления и терморазрушения масла. Данный результат применен в устройстве-индикаторе опасной концентрации летучей примеси (рис. 2). Вследствие высокой интенсивности теплообмена, достигаются наибольшие быстродействие и чувствительность по сравнению с аналогами.

Наряду с выявлением летучих примесей в маслах, возможно решение самостоятельной задачи – сопоставления кратковременной термоустойчивости контролируемых образцов.



**Рис. 1** Амплитуда полезного сигнала в зависимости от температуры перегрева зонда. Параметром служит влагосодержание (в граммах на тонну масла, числа у кривых) в турбинном масле Тп-22С



**Рис. 2** Внешний вид устройства

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты 06-08-01324,07-08-96048\_урал и гранта Президента РФ «Ведущие научные школы», проект НШ-4429.2006.8.

*Г. В. Шишкина*

ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

### **СИСТЕМА ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ УСТРОЙСТВЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Измерительные устройства для исследования теплофизических свойств (ТФС) плоских образцов дисперсных материалов в основном базируются на модели, которая предусматривает создание на внешних границах постоянной температуры, что вызывает необходимость использования для этой цели термостатов (обычно жидкостных), в которых действует управляемая система проточной охлаждающей или нагревающей жидкости для поддержания заданной температуры. Применение таких термостатов для измерительных устройств или систем оправдано в лабораторных условиях, где можно использовать громоздкое стационарное оборудование, но для промышленных условий контроль ТФС требует использования автономных

мобильных измерительных устройств и систем. Высокоточные и быстродействующие современные измерительно-вычислительные микропроцессорные системы позволяют создавать малогабаритные измерительные устройства с несколькими измерительными и управляющими каналами. Поэтому возникла возможность создания измерительного устройства, на внешних границах которого применены специальные блоки, поддерживающие условия тепловой защиты. Блоки тепловой защиты состоят из плоского электронагревателя и двух термопреобразователей сопротивления, разделенных слоями электроизолятора (пластинами из ситалла), которые подключены в мостовую схему. Элементы мостовых схем этих блоков расположены на небольших платах, которые находятся в пустотелых опорных дисках измерительного устройства. Блоки тепловой защиты при определенном подключении используются также для создания заданной начальной и постоянной по всему объему температуры в измерительном устройстве, т.е. могут выполнять роль термостатов и термостабилизаторов.

Измерительное устройство с внешней тепловой защитой разработано специально для промышленных условий контроля ТФС, так как оно автономно, мобильно и может быть сравнительно далеко вынесено от основного обрабатываемого информативного блока измерительно-вычислительного комплекса или автоматизированной системы научных исследований.

*Ю.Л. Муромцев, Р.В. Гребенников, П.В. Малев*

ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

### **БИНАРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВКЛЮЧАЕМОСТЬ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ**

Повышение эффективности информационно-измерительных систем (ИИС) связано с исследованием их основных свойств, определяющих качество функционирования в процессе эксплуатации. Наиболее важными свойствами ИИС являются устойчивость к ошибочным измерениям и гарантированность результатов измерений при различных внешних воздействиях. В задачах анализа и синтеза ИИС, а также для оценки эффективности этих систем широкое применение находят различные виды моделей описания процессов получения, обработки, преобразования, отображения и выдачи информации.

Будем полагать, что рассматриваемые ИИС относятся к классу сложных динамических систем (СДС), рассматриваемых на множестве состояний функционирования (МСФ). В этих моделях можно выделить две части: первая отражает изменение вектора фазовых координат объекта, вторая – изменение переменной состояния функционирования. Для краткости такие модели будем называть бинарными.

Первая часть бинарной модели ( $M$ ), применительно к одному значению переменной состояния функционирования, в общем случае запишем в виде кортежа из пяти символов  $M = \langle Z, X_{(.)}, Y; \varphi, \psi \rangle$ , где  $Z, Y$  – множества значений векторов фазовых координат  $z$  и выхода  $y$ , соответственно;  $X_{(.)}$  – множество траекторий  $x(\cdot) = \{x(t), t \in [t_0, t_k]\}$  вектора входа  $x \in X$  при изменении времени на интервале  $[t_0, t_k]$ ;  $T$  – множество моментов времени;  $\varphi, \psi$  – операторы – переходная функция ( $\varphi$ ) и выходное отображение ( $\psi$ ).

Модель  $M$  будем называть элементарной (простейшей), так как она не учитывает изменения операторов  $\varphi, \psi$  (и их параметров) в процессе функционирования системы. При реальной эксплуатации ИИС происходят изменения производственных ситуаций и работоспособности составных частей. Для учета этих изменений введем независимую переменную  $h$ , учитывающую изменение состояний функционирования, и множество ее значений  $H$  – множество состояний функционирования. Изменение  $h$  происходит, как правило, в случайные моменты времени и задается оператором  $\gamma$ .

Каждому значению  $h \in H$  соответствует пара операторов  $\varphi_h, \psi_h$ ,  $\varphi_h \in \Phi$ ,  $\psi_h \in \Psi$ , т.е.  $\eta: T \times H \rightarrow (\Phi, \Psi)$ .

Модель функционирования ИИС, учитывающую изменение переменной  $h$ , будем называть бинарной моделью и обозначать  $M$ . Модель  $M$  задается в виде  $M = \{Z, X_{(.)}, Y, H; \Phi, \Psi, \gamma, \eta\}$ .

В бинарных моделях ИИС учитываются два рода информационных процессов. Процессы первого рода содержат данные об используемых воздействиях, измеряемых, преобразуемых и других величинах. Процессы второго рода отражают изменения параметров, структуры и условий функционирования ИИС. Совместное рассмотрение процессов первого и второго рода в ИИС позволяет более полно исследовать свойства систем и решать задачи повышения их эффективности.

В зависимости от возможности изменения и идентификации переменной  $h$  на временном интервале измерения  $T_{ин}$  можно выделить четыре класса бинарных моделей. Бинарная модель ИИС относится: к первому классу, если для каждого временного интервала  $T_{ин}$  значение  $h$  постоянно и известно; ко второму классу, если значение  $h$  на интервале  $T_{ин}$  постоянно, но неизвестно; к третьему классу, если в пределах  $T_{ин}$  значение  $h$  может изменяться, при этом  $\forall t \in T_{ин}$  значение  $h$  известно; к четвертому классу, в пределах  $T_{ин}$  значение  $h$  может изменяться, но траектория ее изменения  $h(\cdot) = (h(t), t \in T_{ин})$  неизвестна.

Для обеспечения устойчивости к ошибочным измерениям и получении гарантированных результатов измерений при различных значениях  $h$  ИИС, описываемые бинарными моделями третьего и четвертого классов, должна обладать включаемостью. Включаемость есть свойство ИИС третьего и четвертого класса, в соответствии с которым границы области, включающей все возможные траектории  $z(\cdot) = (z(t), t \in T_{ин})$  при различных  $h(\cdot)$ , определяются значениями траекторий  $z_h(\cdot) = (z_h(t), t \in T_{ин})$ , соответствующих отдельным состояниям  $h \in H$ .

Рассмотренный подход выделения двух видов информационных процессов в ИИС и использование бинарных моделей

позволяют свести к минимуму риски при проведении сложных измерений. Это достигается, во-первых, за счет учета возможных изменений состояний функционирования на временном интервале измерения и, во-вторых, использованием концепции включаемости при анализе качества работы системы.

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |    |
|---|----|
| <b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b> .....  | 3  |
| <b>ПРОГРАММА</b> .....  | 5  |
| <b>ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ</b>  |    |
| <i>Битюков В.К., Худак Ю.И.</i> Аналитический вывод закона Стефана-Больцмана из закона Планка .....   | 28 |
| <i>Карташов Э.М.</i> Тепловое разрушение .....  | 32 |
| <i>Киселев М.И.</i> Хронометрия – фундамент прикладной метрологии .....   | 35 |
| <i>Петров В.А.</i> Фазовые переходы и образование двухфазной зоны в условиях радиационно-кондуктивного теплопереноса .....  | 40 |
| <i>Печенегов Ю.Я.</i> Интенсификация теплообмена как средство энерго- и ресурсосбережения .....   | 46 |
| <i>Савватимский А.И.</i> Температура плавления графита .....  | 51 |
| <br><b>Секция 1</b>   |    |
| <b>ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕПЛОФИЗИКИ</b>  |    |
| <br><b>ЛЕКЦИИ</b>   |    |
| <i>Битюков В.К., Макаров Д.Е., Улыбин С.А.</i> Температурные поля и образование расплава при нагреве оксида алюминия потоком лазерного излучения различной плотности .....                                    | 54 |
| <i>Дмитриев О.С., Мищенко С.В., Дмитриев С.О., Херрман А.З., Хоффмейстер К.</i> Особенности исследования теплофизических и кинетических характеристик углепластиков в процессе отверждения .....              | 58 |
| <i>Жаврин Ю.И., Поярко И.В., Федоренко О.В.</i> Диффузионная неустойчивость трехкомпонентных газовых систем в каналах различной геометрии .....   | 61 |
| <i>Кориунов И.Г., Уймин А.А.</i> Температуропроводность и теплопроводность контактных зон биметаллов, полученных высокоэнергетическим ударным нагружением металлов контактных пар .....                       | 68 |
| <i>Промтов М.А.</i> Повышение качественных характеристик нефтепродуктов при импульсной энергетической обработке .....   | 69 |
| <i>Сафаров М.М., Аминов Ш.А.</i> Применение гидразина и его водных растворов для предотвращения образования железокислых отложений и измерение теплопроводности .....   | 74 |
| <br><b>Устные доклады</b>   |    |
| <i>Анкушева Н.Б., Акылбекова Г., Косов В.Н.</i> Влияние пористости среды на возникновение неустойчивости механического равновесия трехкомпонентной газовой смеси при диффузии в изотермических условиях ..... | 78 |
| <i>Езерский В.А., Ельчищева Т.Ф.</i> Верификация коэффициента теплопроводности засоленных стеновых материалов на основе физико-статистического подхода .....  | 82 |
| <i>Жаврин Ю.И., Поярко И.В., Федоренко О.В.</i> Описание многокомпонентной диффузии в двухколбовом аппарате с применением языка программирования DELPHI .....   | 88 |
| <i>Забавников М.В., Беляев П.С., Маликов О.Г.</i> К решению проблем качества автомобильных дорог через новые сырьевые компоненты дорожных связующих и прогрессивные технологии их производства .....          | 90 |
| <i>Ищук И.Н.</i> Принципы тепловой дефектоскопии и томогра-   |    |

|   |     |
|---|-----|
| фии на основе численного решения коэффициентных задач теплопроводности . . . . .  | 95  |
| <b>Курланов Л.И.</b> Равновесные и неравновесные теплофизические свойства молекулярно-кластерных смесей газов . . . . .   | 98  |
| <b>Майникова Н.Ф.</b> Определение закона движения границы фазового перехода . . . . .   | 100 |
| <b>Макаров Д.Е., Петров В.А., Титов В.Е.</b> Двухфазная зона и скачок коэффициента поглощения при интенсивном нагреве оксида алюминия . . . . .   | 105 |
| <b>Печенегов Ю.Я., Дубровин М.В.</b> Теплообмен при лобовом натекании на отвод трубчатого змеевика . . . . .  | 109 |
| <b>Печенегов Ю.Я., Серов Д.Ю., Махунов И.А.</b> Моделирование и оптимизация подогревателей нефти с рециркуляцией продуктов сгорания топлива . . . . .   | 112 |
| <b>Пономарев С.В., Мочалин С.Н.</b> Математическое моделирование методов измерения коэффициента диффузии влаги в капиллярно-пористых материалах . . . . .   | 116 |
| <b>Тауров Э. Ш., Сафаров М. М., Тиллоева Т.Р., Сайдуллаева М.С.</b> Расчетно-экспериментальное исследование термодинамических и теплофизических свойств катализаторов системы (Ni + Al) и (Al + Cu) . . . . . | 119 |
| Стендовые доклады   |     |
| <b>Акрамов М.Б., Эрзолов Б.Б.</b> Теплофизические характеристики шамотных огнеупорных кирпичей, используемых при футеровке электролизеров с обожженными анодами . . . . .                                     | 121 |
| <b>Балабанов П.В., Пономарев С.В.</b> Математическая модель теплопереноса в процессе регенерации воздуха . . . . .  | 123 |
| <b>Беляев М.П.</b> Неразрушающий контроль влажностеплопроводности монолитных строительных материалов . . . . .  | 124 |
| <b>Беляев М.П.</b> К вопросу о неразрушающем экспресс-контроле качественных показателей бумаги . . . . .  | 125 |
| <b>Дмитриев С.О., Дмитриев А.О.</b> Теплофизические свойства углеродных нанотрубок . . . . .  | 126 |
| <b>Зарипова М.А., Зоиров Х.А., Бадалов А.Б., Сафаров М.М.</b> Удельная изобарная теплоемкость и энтальпии водных растворов этилгидразина . . . . .  | 128 |
| <b>Зарипова М.А., Тиллоева Т.Р., Тауров Э.Ш., Сафаров М.М.</b> Теплопроводность и плотность алкилзамещенных водных растворов в зависимости от температуры при атмосферном давлении . . . . .                  | 130 |
| <b>Ильина С.Г., Никулин А.В.</b> Показатель преломления поверхностного слоя на границе раздела жидкость – пар системы метанол – гептан в окрестности критической температуры . . . . .                        | 132 |
| <b>Кулешов О.Ю., Седёлкин В.М.</b> К расчету локальных характеристик радиационного и сложного теплообмена в рамках зонального метода . . . . .  | 133 |
| <b>Кулешов О.Ю., Седёлкин В.М.</b> Двухфазная математическая модель тепловлагопереноса в выпекаемом тестовом изделии . . . . .  | 135 |
| <b>Магомадов А.С., Мальцев Р.Г.</b> Плотность фракций газовых конденсатов при различных температурах и давлениях . . . . .  | 137 |
| <b>Мальцев Р.Г., Магомадов А.С.</b> Обобщенное уравнение плотности фракций газовых конденсатов при различных температурах и давлениях . . . . .   | 139 |
| <b>Матказина А.А., Грунин А.Н., Устинов Н.А.</b> Снижение гидравлического сопротивления противочных циклонов . . . . .  | 141 |

|  |     |
|--|-----|
| <i>Микита Г.И.</i> Исследование температурного коэффициента линейного расширения волновым методом . . . . .  | 144 |
| <i>Мухамадиев М.С., Бобошеров Д.И., Давлатшоев С.К., Сафаров М.М.</i> Тепло- и электрофизические свойства воды водохранилища Байпазинской гидроэлектростанции . . . . .                                    | 147 |
| <i>Нажмудинов Ш.З., Подерни Р.Ю., Тагоева Н.У., Бобиев С.С., Сафаров М.М.</i> Теплофизические свойства рабочей жидкости горных машин в широком интервале параметров состояния . . . . .                    | 150 |
| <i>Пирмадов М.Д., Сафаров М.М.</i> Влияние влажности на изменение плотности и теплопроводности порошков . . . . .  | 151 |
| <i>Савина Ю.В., Богатов Е.М.</i> Об определении геометрических инвариантов излучения в полости сложного вида с затенением . . . . .  | 154 |
| <i>Самиев К.А., Сафаров М.М., Сафаров А.М., Ганиев И.Н.</i> Линейные расширение и сжимаемости сплавов системы (Al + Be + PЗМ) . . . . .  | 157 |
| <i>Юсупов Ш.Т., Тагоев С.А., Зарипова М.А., Сафаров М.М., Нуриддинов З.</i> Методы расчета теплоемкости углеводородов и их производных, основанные на модельных представлениях и методах подобия . . . . . | 158 |

## Секция 2

### НОВЫЕ МЕТОДЫ, ПРИБОРЫ И УСТАНОВКИ ДЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

#### Лекции

|  |     |
|--|-----|
| <i>Вертоградский В.А.</i> Комплекс методов для эффективных исследований теплофизических свойств материалов . . . . .   | 162 |
| <i>Волосников Д.В., Скрипов П.В.</i> Импульсный теплофизический контроль аварийного смешения жидких сред . . . . .   | 164 |
| <i>Дивин А.Г., Ковалев Е.Н.</i> Устройство для реализации комплекса методов измерения теплофизических характеристик твердых, сыпучих и жидких материалов . . . . . | 168 |
| <i>Ивлиев А.Д.</i> Установки для измерения теплопроводности конденсированных материалов при высоких температурах. Метод температурных волн . . . . .               | 170 |

#### Устные доклады

|  |     |
|--|-----|
| <i>Анучин С.А., Середа Г.Н., Степанов П.А.</i> Методика высокотемпературных исследований теплофизических свойств керамических материалов аэрокосмического назначения . . . . . | 172 |
| <i>Балашов А.А., Жуков Н.П.</i> Определение условий адекватности модели распределения тепла реальному процессу при теплофизическом контроле . . . . .                          | 176 |
| <i>Горбатов В.И., Скрипов П.В., Смотрицкий А.А.</i> Метод исследования теплофизических свойств масел в перегретых состояниях . . . . .   | 180 |
| <i>Лобанов С.М., Скрипкин А.С.</i> Оптимальная по квадратичному критерию идентификация теплофизических свойств материалов . . . . .  | 184 |
| <i>Лонцаков О.А., Пашанин А.В., Гумеров Ф.М.</i> Установка для исследования эффективности работы маслonaполненного трансформатора . . . . .                                    | 187 |

#### Стендовые доклады

|  |  |
|--|--|
| <i>Антонова Л.Л., Чуриков А.А.</i> Методы и автоматизированная |  |
|--|--|

|  |     |
|--|-----|
| система неразрушающего контроля комплекса теплофизических свойств . . . . .  | 191 |
| <i>Антонова Л.Л., Чуриков А.А.</i> Определение режимных параметров теплофизического эксперимента в зависимости от заданной толщины исследуемого образца . . . . .                      | 195 |
| <i>Артюхина Е.Л.</i> Измерение теплофизических свойств твердых материалов методом регулярного режима 3-го рода . . . . .   | 198 |
| <i>Балашов А.А., Сундуков М.С.</i> Имитационное исследование метода неразрушающего контроля структурных переходов в полимерах . . . . .  | 200 |
| <i>Банников А.Н., Пудовкин А.П., Чернышова Т.И.</i> Метод неразрушающего контроля металлофторопластовых материалов . . . . .   | 204 |
| <i>Баршутина М.Н., Мордасов Д.М., Мордасов М.М.</i> Измерение плотности в малых объемах жидкости барботажным методом . . . . .   | 206 |
| <i>Булгаков Н.А., Мордасов Д.М., Епифанов С.В.</i> О возможности пневмодинамического измерения пористости сыпучего материала . . . . .   | 208 |
| <i>Ведешкина Л.А.</i> Выбор параметров, контролируемых в процессе рассиропки при производстве спирта из мелассы . . . . .  | 209 |
| <i>Гребенникова Н.М.</i> Установка для исследования динамики взаимодействия струи газа с вязкой жидкостью . . . . .  | 212 |
| <i>Гребенникова Н.М., Вязовов В.Б.</i> Модель вертикального движения лунки, образованной на поверхности вязкой жидкости . . . . .  | 214 |
| <i>Епифанов С.В., Мордасов Д.М.</i> Струйный генератор в устройствах контроля плотности сыпучих материалов . . . . .   | 216 |
| <i>Заянов Э.Р., Гиниятуллин А.А., Горбатов В.И., Старостин А.А., Попцов М.А., Шангин В.В.</i> Аппаратура для измерения температуропроводности в режиме субсекундного нагрева . . . . . | 217 |
| <i>Котов И.О., Чернышов В.Н., Дмитриев Д.А., Федюнин П.А.</i> Микроволновой поляризационный метод измерения влажности и теплопроводности материалов . . . . .                          | 218 |
| <i>Курлапов Л.И., Скорняков А.Ю.</i> Анализ решения уравнения теплопроводности на основе подсчета производства энтропии . . . . .  | 222 |
| <i>Маковеев С.Н., Нистратова Е.А., Липовских Ю.С.</i> Моделирование массопереноса для диагностики и контроля качественных характеристик . . . . .                                      | 222 |
| <i>Минин Д.В., Швецова Е.Б.</i> Вектор развития программно-аппаратных комплексов . . . . .   | 224 |
| <i>Мордасов М.М., Козадаева М.М.</i> Объемометрический пузырьковый метод контроля вязкости жидкостей . . . . .   | 226 |
| <i>Мордасов М.М., Савенков А.П.</i> Пневмоэлектрическое устройство для бесконтактного неразрушающего контроля вязкости . . . . .   | 228 |
| <i>Пудовкин А.П., Москвитин С.П., Кольтюков Н.А.</i> Метод и измерительная система контроля качества материалов радиоэлектронной техники . . . . .                                     | 230 |
| <i>Самуйлов В.С.</i> Экспериментальная установка для исследования скорости звука в чистых жидкостях и растворах в широком диапазоне параметров состояния . . . . .                     | 234 |
| <i>Сенкевич А.Ю.</i> Учет неравномерного начального распределения температуры в задачах неразрушающего теплофизического контроля образцов . . . . .                                    | 235 |
| <i>Серегин М.Ю., Тамбовский Д.М.</i> Правила проектирования компьютерных анализаторов . . . . .  | 237 |

|  |     |
|--|-----|
| <i>Серезин М.Ю., Тамбовский Д.М.</i> Портативные аналитические приборы на основе карманных персональных компьютеров .....  | 239 |
| <i>Сысоев Э.В., Чернышов А.В.</i> Метод бесконтактного неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов .....                                  | 241 |
| <i>Уймин А.А., Низамутдинов Д.Ф.</i> Автоматизированная лазерная установка для определения локальных теплофизических характеристик неоднородных материалов ..... | 243 |
| <i>Чернышов В.Н., Иванов Г.Н., Чернышов А.В.</i> Комбинированный метод неразрушающего контроля теплофизических свойств трехслойных изделий .....                 | 244 |
| <i>Чернышова Т.И., Нистратов М.И.</i> Метрологическая надежность средств теплофизических измерений с учетом влажности окружающей среды .....                     | 248 |
| <i>Чуриков А.А., Шишкина Г.В.</i> Выбор оптимальных параметров теплофизического эксперимента .....   | 250 |
| <i>Шангин В.В., Смотрицкий А.А., Волосников Д.В., Старостин А.А.</i> Устройство экспресс-контроля летучих примесей в маслах .....                                | 252 |
| <i>Шишкина Г.В.</i> Система тепловой защиты в измерительном устройстве для исследования теплофизических свойств дисперсных материалов .....                      | 254 |
| <i>Муромцев Ю.Л., Гребенников, Р.В., Малев П.В.</i> Бинарное моделирование и включаемость информационно-измерительных систем .....                               | 255 |



НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

**ТЕПЛОФИЗИКА В ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИИ  
И УПРАВЛЕНИИ КАЧЕСТВОМ**

МАТЕРИАЛЫ ШЕСТОЙ МЕЖДУНАРОДНОЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОЙ ШКОЛЫ

Часть I

Редактор Т.М. Глинкина  
Компьютерное макетирование Е.П. Постниковой

Подписано в печать 9.07.2007.  
Формат 60 × 84 / 16. 15,34 усл. печ. л.  
Тираж 400 экз. Заказ № 463

Издательско-полиграфический центр  
Тамбовского государственного технического университета  
392000, Тамбов, Советская 106, к. 14