

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

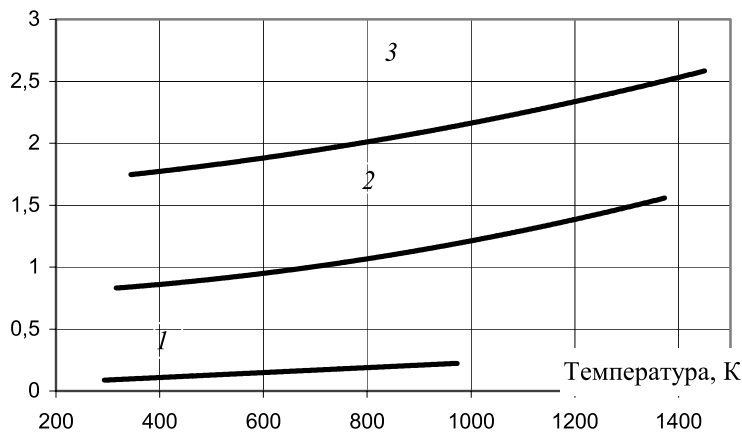
ББК ◀311

**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



**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

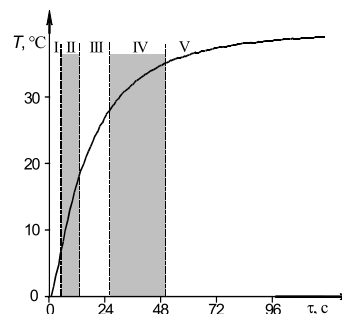
При решении задач контроля теплофизических свойств (ТФС) материалов определенный интерес представляют методы неразрушающего контроля (НК) с использованием круглого плоского нагревателя постоянной мощности. Это определяется тем, что ТФС материала находят на основании косвенных измерений и рассчитывают 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]:

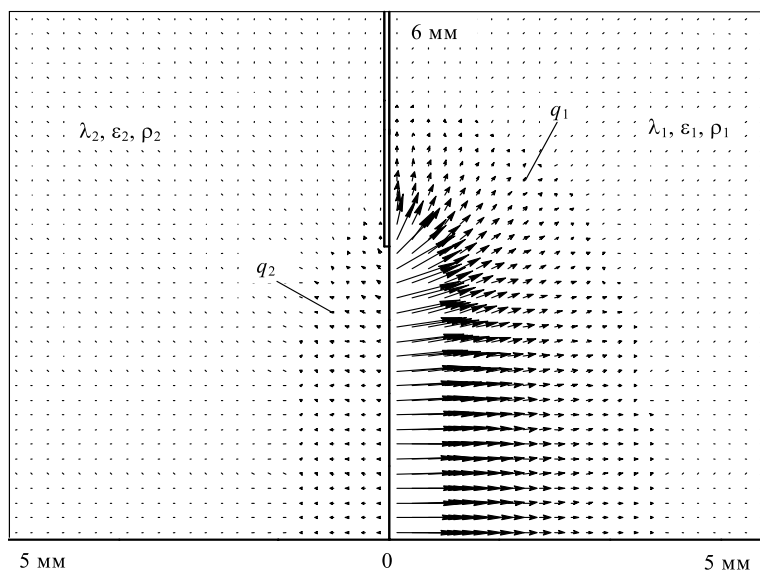
$$T_1(0, \tau) = \frac{2q\sqrt{\tau}}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)\sqrt{\pi}} - \frac{qc_H}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2},$$

где  $T_1$ ,  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  – избыточная температура, тепловые активности материалов исследуемого изделия и подложки зонда, соответственно;  $q$  – тепловой поток;  $\tau$  – время;  $c_H$  – 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].

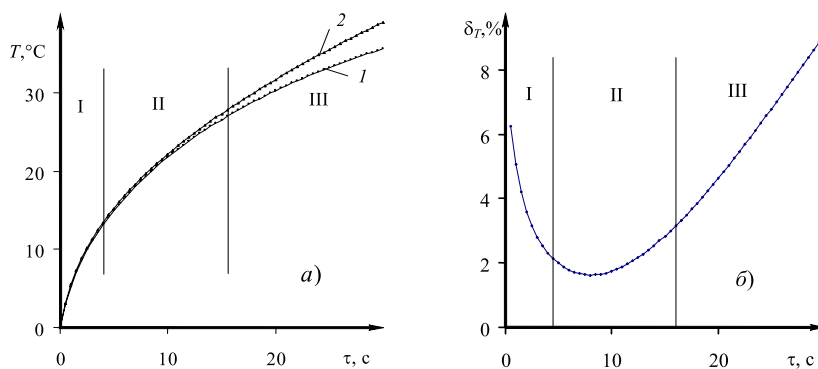


Рис. 3 Термограммы (а), построенные для системы двух полуограниченных тел и зависимость  $\delta_T = f(\tau)$  (б)

#### 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.