

*На правах рукописи*

**БАЛАБАНОВ Павел Владимирович**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА И АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ  
УСТАНОВКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ  
СВОЙСТВ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ПРОДУКТОВ**

05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ,  
материалов и изделий

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тамбов 2004

Работа выполнена на кафедре "Автоматизированные системы и приборы" Тамбовского государственного технического университета.

**Научный руководитель**

Доктор технических наук, профессор  
*Пономарев Сергей Васильевич*

**Официальные оппоненты:**

Доктор технических наук, профессор  
*Чернышов Владимир Николаевич*

Кандидат технических наук, доцент  
*Штейнбрехер Валерий Васильевич*

Защита диссертации состоится 18 июня 2004 года в 13 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.260.01 Тамбовского государственного технического университета по адресу: 392000, г. Тамбов, Советская, 106, ТГТУ, конференц-зал.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, скрепленные гербовой печатью, просим направлять по адресу: 392000, г. Тамбов, Советская, 106, ТГТУ, секретарю диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТГТУ.

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " мая 2004 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, проф



**А.А. Чуриков**

---

---

Подписано к печати 12.05.2004

Гарнитура Times New Roman. Формат 60 × 84/16. Бумага офсетная.

Печать офсетная. Объем: 0,93 усл. печ. л.; 1,0 уч.-изд. л.

Тираж 100 экз. С. 352

Издательско-полиграфический центр ТГТУ

392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертационной работы.** При работе человека в экстремальных условиях, например под землей, под водой или в космосе, зачастую возникают проблемы недостатка кислорода и избытка углекислого газа во вдыхаемом воздухе. Такие ситуации случаются при авариях на подводных лодках, в шахтах, при пожарах, в условиях сильного задымления помещений. Поэтому создаются средства индивидуальной и коллективной защиты – средства регенерации, предназначенные для поддержания необходимого для обеспечения жизнедеятельности человека газового состава атмосферы.

Процессы восстановления атмосферы с помощью современных средств регенерации связаны с использованием хемосорбентов и сорбентов (регенеративных продуктов) для удаления углекислого газа и выделения кислорода.

В настоящее время разрабатываются новые системы регенерации воздуха и регенеративные продукты (РП), являющиеся жизненно важной потребностью современного производства. Свойства новых РП, в том числе их теплофизические свойства (ТФС), представляют значительный интерес.

В средствах регенерации, в частности в регенеративных патронах, наиболее часто применяются РП в виде образцов, имеющих форму круглых многоканальных дисков. В связи с этим использование методов, предполагающих измерение температур в одной или нескольких точках образца, нежелательно. Это связано с тем, что в процессе измерения датчик температуры, например термоэлектрический термометр, может попасть в канал образца и измерять температуру не РП, а воздуха в канале. В силу того, что РП обладают высокой химической активностью, измерительные устройства должны обеспечивать минимальный контакт исследуемых образцов с углекислым газом и парами воды, содержащимися в воздухе. В процессе измерения перегрев образца не должен вызывать протекание химической реакции в РП.

Выполненный литературный обзор, приведенный в диссертационной работе, показал, что не существует методов измерения комплекса ТФС применяемых на практике образцов из химически активных РП, имеющих форму плоских дисков с каналами. Известные методы измерения требуют адаптации применительно к измерению свойств указанных материалов.

Поэтому задача создания метода и автоматизированной установки, позволяющих с требуемой точностью и за небольшой промежуток времени измерять средние по объему образца ТФС, является важной и актуальной.

**Целью работы** является разработка метода и устройства, обеспечивающих повышение точности измерения ТФС образцов регенеративных продуктов при рациональных затратах времени на проведение эксперимента.

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи: а) разработаны физическая модель измерительной ячейки (ИЯ) и математическая модель температурного поля в измерительной ячейке; б) разработан метод, позволяющий повысить точность измерения комплекса ТФС РП, при сокращении длительности этапов эксперимента; в) проведен анализ возможных источников погрешностей и даны теоретические оценки погрешностей измерения ТФС разработанным методом; г) на основании выполненного анализа источников погрешностей и теоретических оценок погрешностей измерения ТФС разработана конструкция измерительной ячейки; д) разработано математическое, алгоритмическое и техническое обеспечение автоматизированной установки для измерения ТФС РП; е) проведены метрологические исследования разработанной автоматизированной установки; ж) проведено исследование теплофизических свойств РП на основе надпероксида калия ( $\text{KO}_2$ ).

**Предметом исследования** является разработка совокупности математического, алгоритмического и технического обеспечения метода и автоматизированной установки для измерения ТФС регенеративных продуктов.

**Методы исследования.** В диссертационной работе были использованы методы математической физики, статистики, а также численные методы.

**Научная новизна работы** заключается в следующем.

1 На основе полученных решений стационарной и нестационарной краевых задач теплопроводности для многослойной плоской симметричной физической модели разработан метод измерения теплофизических свойств образцов регенеративных продуктов, позволяющий повысить точность измерения за счет выбора оптимальных конструктивных параметров измерительной ячейки и режимных параметров проведения эксперимента.

2 Разработано алгоритмическое обеспечение процессов измерения и обработки экспериментальных данных, позволяющее автоматизировать управление экспериментом, сократить длительность его этапов и повысить точность измерений, включающее в себя: а) контроль предложенных динамических параметров в ходе первого и второго этапов эксперимента в целях определения рациональных моментов их окончания; б) выделение на втором этапе экспериментальных данных, соответствующих диапазону динамического параметра  $0,1 \leq \tilde{\theta}_1 \leq 0,4$ , в целях повышения точности измерения теплопроводности; в) методику уменьшения систематических погрешностей путем введения поправок в результаты измерения теплофизических свойств.

3 На основе выполненного метрологического анализа определены доминирующие источники погрешностей и получены зависимости погрешностей измерения теплофизических свойств от измеряемой разности температур и от динамических параметров, что позволило выработать рекомендации по повышению точности измерения.

**Практическая значимость.** Создана автоматизированная установка для измерения ТФС РП. Создана программа управления ходом измерения и обработкой экспериментальных данных. Исследованы ТФС РП. Результаты исследования ТФС РП использовались при математическом моделировании температурных полей в регенеративных патронах, что позволило решить задачу тепловой защиты средств регенерации воздуха и повысить их качество.

Результаты работы приняты к использованию в Тамбовском научно – исследовательском химическом институте (ФГУП "ТамбовНИХИ") в 2004 г.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались в ходе школы-семинара молодых ученых "Метрология, стандартизация, сертификация и управление качеством продукции" (Тамбов, 2003), на международной научно-технической конференции "Измерение, контроль, информатизация" (Барнаул, 2003), на VIII научной конференции ТГТУ (Тамбов, 2003), на XVI международной научной конференции "Математические методы в технике и технологиях" (Санкт-Петербург, 2003).

**Публикации.** Теоретические и практические результаты диссертационной работы опубликованы в 11 научных статьях и тезисах докладов.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений.

Основная часть диссертационной работы изложена на 145 страницах машинописного текста. Работа содержит 32 рисунка и 21 таблицу. Список литературы включает 109 наименований. В работе имеется 9 приложений на 32 страницах машинописного текста.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, раскрыта научная новизна и практическая значимость работы, показаны результаты реализации и апробации, изложено краткое содержание диссертации.

**В первой главе** приведен обзор и анализ методов и устройств для измерения ТФС твердых неметаллических материалов.

На основе выполненного обзора и анализа методов измерений можно сделать вывод, что из-за специфических свойств РП существующие приборы и методы не могут быть использованы для измерения ТФС образцов РП. Поэтому поставлена задача разработки метода и устройства для измерения ТФС РП. Намечены пути ее решения. Наиболее перспективными для решения поставленной задачи, по мнению автора, являются методы, сочетающие стационарную стадию теплопереноса для измерения теплопроводности и нестационарную стадию теплопереноса, а именно, регулярный тепловой режим 1-го рода, предназначенный для измерения температуропроводности.

**Во второй главе** проведен анализ объекта исследования, которым являются образцы РП (диаметр 113 мм, толщина 8 мм), со сквозными отверстиями (каналами) диаметром 4 мм, предназначенными для продувки через образцы газозооной смеси (ГВС), содержащей  $\text{CO}_2$  и влагу. При продувке ГВС происходит поглощение  $\text{CO}_2$  и выделение кислорода и теплоты. На основании проведенного анализа объекта исследования, сформулированы требования к методу измерения ТФС РП.

Разработанный метод должен обеспечивать измерение ТФС образцов РП, имеющих диаметр 113 мм, толщину 7,5...8 мм и каналы диаметром 4 мм, в диапазонах: теплопроводности 0,05...0,95 Вт/(мК), температуропроводности  $(0,7...1,5) \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ . В силу того, что РП является химически активным к  $\text{CO}_2$  и влаге, контакт образцов с воздухом в измерительной ячейке должен быть минимальным, а с органическими веществами и водой исключен. Погрешность измерения ТФС не должна превышать 15 %. Процесс измерения и обработки экспериментальных данных должен быть автоматизирован.

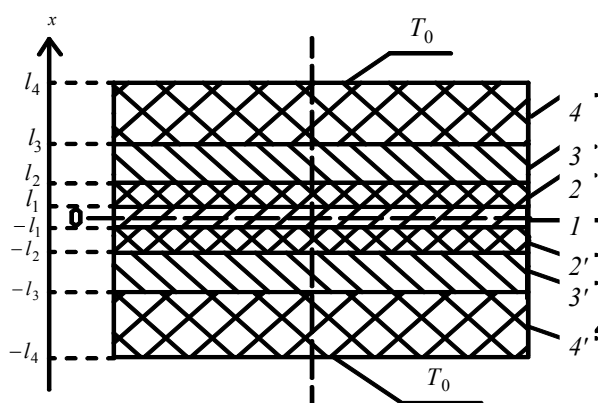


Рис. 1 Физическая модель измерительной ячейки

Предложена физическая модель измерительной ячейки (ИЯ), представляющая собой плоскую, многослойную, симметричную систему (рис. 1).

Первый слой 1 системы – источник теплоты (нагреватель) и термометр сопротивления, изготовленные из навитых по спирали Архимеда манганиновой и медной проволок, соответственно. Использование термометра сопротивления большой площади и малой толщины позволяет

исключить погрешности, которые могли бы возникнуть при попадании малогабаритного датчика температуры в канал образца РП. Слои 2 и 2', 3 и 3' – защитные оболочки, предотвращающие соприкосновение исследуемых образцов 4 и 4' с источником теплоты. Причем, слои 2 и 2' изготовлены из диэлектрика, а слои 3 и 3' изготовлены из металла. Температура  $T_0$  внешних поверхностей исследуемых образцов поддерживается постоянной. Симметричность построенной физической модели позволила в дальнейшем обойтись без использования эталонных материалов в конструкции ИЯ.

Для упрощения записи математической модели температурного поля в ИЯ сформулированы следующие допущения: а) температурное поле в многослойной системе считается одномерным; б) температура  $T_0$  на внешних границах плоской системы поддерживается постоянной; в) термические сопротивления на поверхностях контакта слоев отсутствуют; г) ТФС слоев системы считаются постоянными величинами, не зависящими от изменения температуры в ходе эксперимента; д) боковые

утечки тепла отсутствуют; е) объемная мощность внутренних источников теплоты 1-го слоя является постоянной величиной, равномерно распределенной по всему объему первого слоя.

С учетом симметричности многослойной системы относительно координаты  $x = 0$  и допущений, математическую модель процесса распространения теплоты можно представить для половины системы ( $0 \leq x \leq l_4$ , причем в качестве первого слоя далее будем считать половину слоя  $I$  на рис. 1) в виде системы дифференциальных уравнений теплопроводности

$$\frac{\partial T_i(x, \tau)}{\partial \tau} = a_i \frac{\partial^2 T_i(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{W_i}{c_i \rho_i}, \quad \tau > 0, \quad l_{i-1} < x < l_i, \quad i = \overline{1, 4}, \quad l_0 = 0, \quad (1)$$

с начальными условиями

$$T_i(x, 0) = T_{hi}(x), \quad (2)$$

с граничными условиями:

$$\left( \frac{\partial T_1(x, \tau)}{\partial x} \right) \Big|_{x=0} = 0, \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_i(x, \tau) \Big|_{x=l_i-0} = T_{i+1}(x, \tau) \Big|_{x=l_i+0}, \\ \lambda_i \frac{\partial T_i(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=l_i-0} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=l_i+0}, \quad i = 1, 2, 3, \end{array} \right. \quad (4)$$

$$T_4(x, \tau) \Big|_{x=l_4} = T_0 = \text{const}, \quad (5)$$

где  $c_i \rho_i$  – объемная теплоемкость;  $\lambda_i$  – теплопроводность;  $a_i$  – температуропроводность;  $W_i$  – объемная мощность внутренних источников теплоты  $i$ -го слоя, причем на первом этапе эксперимента:  $W_1 = \text{const}$ ,  $W_2 = W_3 = W_4 = 0$ , а на втором этапе  $W_1 = W_2 = W_3 = W_4 = 0$ ;  $T_{hi}(x)$  – функции начального распределения температуры;  $T_0$  – температура термостатирования.

Эксперимент по измерению теплофизических свойств проводится в два этапа (рис. 2). На первом этапе подводят

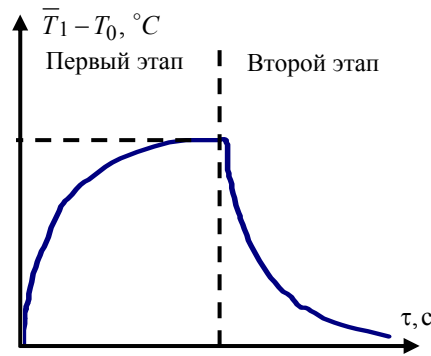


Рис. 2 Два этапа проведения эксперимента

постоянное напряжение  $U$  на нагреватель, в результате чего в слое  $I$  выделяется теплота с объемной мощностью  $W_1 = U^2 / (RV)$ , где  $R$  – сопротивление нагревателя,  $V$  – объем первого слоя. Дожидаются наступления в системе стационарного состояния и, по измеренной в стационарном состоянии разности между среднеинтегральной температурой 1-го слоя  $\bar{T}_{1\infty}$  и температурой термостатирования  $T_0$ , вычисляют теплопроводность исследуемого образца  $\lambda_4$  по формуле

$$\lambda_4 = h_4 / \left( \frac{2(\bar{T}_{1\infty} - T_0)}{W_1 h_1} - \frac{1}{6} \frac{h_1}{\lambda_1} - \frac{h_2}{\lambda_2} - \frac{h_3}{\lambda_3} \right), \quad (6)$$

где  $h_1 = 2l_1$ ,  $h_2 = (l_2 - l_1)$ ,  $h_3 = (l_3 - l_2)$ ,  $h_4 = (l_4 - l_3)$ .

Формула (6) получена из решения краевой задачи (1) – (5) при  $\tau \rightarrow \infty$ .

На втором этапе эксперимента подвод напряжения к нагревателю прекращают и с постоянным шагом по времени измеряют разность между среднеинтегральной температурой первого слоя  $\bar{T}_1$  и температурой термостатирования  $T_0$ . Отсчет времени на втором этапе начинают с нуля (с момента отключения напряжения питания нагревателя). Температуропроводность исследуемого материала вычисляется из решения нестационарной задачи

$$\frac{\partial \Theta_i(\bar{x}, Fo)}{\partial Fo} = \beta_i \frac{\partial^2 \Theta_i(\bar{x}, Fo)}{\partial \bar{x}^2}, \quad \frac{l_{i-1}}{l_4} < \bar{x} < \frac{l_i}{l_4}, \quad Fo > 0, \quad i = \overline{1,4}, \quad l_0 = 0, \quad (7)$$

с начальными условиями

$$\Theta_i(\bar{x}, Fo) \Big|_{\frac{l_{i-1}}{l_4} < \bar{x} < \frac{l_i}{l_4}, Fo=0} = \Theta_{in}(\bar{x}), \quad i = \overline{1,4}, \quad (8)$$

с граничными условиями

$$\frac{\partial \Theta_1(\bar{x}, Fo)}{\partial \bar{x}} \Big|_{\bar{x}=0} = 0, \quad (9)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Theta_i(\bar{x}, Fo) \Big|_{\bar{x}=\frac{l_i}{l_4}-0} = \Theta_{i+1}(\bar{x}, Fo) \Big|_{\bar{x}=\frac{l_i}{l_4}+0}, \\ \lambda_i \left( \frac{\partial \Theta_i(\bar{x}, Fo)}{\partial \bar{x}} \right) \Big|_{\bar{x}=\frac{l_i}{l_4}-0} = \lambda_{i+1} \left( \frac{\partial \Theta_{i+1}(\bar{x}, Fo)}{\partial \bar{x}} \right) \Big|_{\bar{x}=\frac{l_i}{l_4}+0}, \quad i = 1, 2, 3, \end{array} \right. \quad (10) \quad \Theta_4(\bar{x}, Fo) \Big|_{\bar{x}=1} = 0, \quad (11)$$

где  $\beta_i = \frac{a_i}{a_3}$ ,  $i = \overline{1,4}$ ,  $\Theta_{in}(\bar{x}) = (T_i(x) - T_0) / (\bar{T}_{1\infty} - T_0)$  – распределение безразмерной температуры в  $i$ -м слое многослойной системы, полученное в конце первого этапа эксперимента,  $Fo = a_3 \tau / l_4^2$  – число Фурье,  $\bar{x} = x / l_4$  – безразмерная координата,  $T_i(x)$  – функции, описывающие распределение температуры в  $i$ -м слое в конце первого этапа эксперимента.

Решение нестационарной задачи (7) – (11), полученное методом разделения переменных, имеет вид

$$\Theta_i(\bar{x}, Fo) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-\varepsilon_n^2 Fo) R_{in}(\bar{x}), \quad i = 1, 2, 3, 4, \quad (12)$$

где  $\varepsilon_n^2, R_{in}(\bar{x})$  – собственные значения и собственные функции краевой задачи Штурма-Лиувилля

$$R_i''(\bar{x}) + \varepsilon^2 / \beta_i R_i(\bar{x}) = 0, \quad i = 1, 2, 3, 4, \quad (13)$$

$$\frac{dR_1(\bar{x})}{d\bar{x}} \Big|_{\bar{x}=0} = 0, \quad (14)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R_i(\bar{x}) \Big|_{\bar{x}=\frac{l_i}{l_4}-0} = R_{i+1}(\bar{x}) \Big|_{\bar{x}=\frac{l_i}{l_4}+0}, \\ \lambda_i \left( \frac{dR_i(\bar{x})}{d\bar{x}} \right) \Big|_{\bar{x}=\frac{l_i}{l_4}-0} = \lambda_{i+1} \left( \frac{dR_{i+1}(\bar{x})}{d\bar{x}} \right) \Big|_{\bar{x}=\frac{l_i}{l_4}+0}, \quad i = 1, 2, 3, \end{array} \right. \quad (15)$$

$$R_4(\bar{x}) \Big|_{\bar{x}=1} = 0. \quad (16)$$

При значениях  $Fo$ , превышающих некоторое  $Fo^*$ , сумма членов ряда (12) мало отличается от значения первого члена, т.е.

$$\Theta_i(\bar{x}, Fo) \approx A_1 \exp(-\varepsilon_1^2 Fo) R_{i1}(\bar{x}), \quad i = \overline{1,4}.$$

На втором этапе эксперимента предлагается измерять разность среднеинтегральной температуры первого слоя и температуры термостатирования с постоянным шагом по времени. Поэтому запишем выражение для вычисления среднеинтегральной безразмерной температуры первого слоя

$$\tilde{\Theta}_1(Fo) \approx \int_0^{l_1/l_4} \Theta_1(\bar{x}, Fo) d\bar{x} \Big/ \int_0^{l_1/l_4} d\bar{x} = A_1 \exp(-\varepsilon_1^2 Fo) \int_0^{l_1/l_4} R_{11}(\bar{x}) d\bar{x} \Big/ \int_0^{l_1/l_4} d\bar{x}.$$

Прологарифмировав последнее выражение, с учетом обозначения

$$B_1 = A_1 \int_0^{l_1/l_4} R_{11}(\bar{x}) d\bar{x} / \int_0^{l_1/l_4} d\bar{x}, \text{ получим функцию}$$

$$\ln \tilde{\Theta}_1(\text{Fo}) = -\varepsilon_1^2 \text{Fo} + \ln B_1, \quad (17)$$

график которой (рис. 3) представляет прямую линию в интервале  $(\text{Fo}^*, \text{Fo}^{**})$ .

По данным второго этапа эксперимента вычисляют среднеинтегральные значения безразмерной температуры первого слоя в моменты времени  $\tau_j$

$$\tilde{\Theta}_{1,j}(\text{Fo}_j) = (\bar{T}_{1,j}(\tau_j) - T_0) / (\bar{T}_{1\infty} - T_0), \quad (18)$$

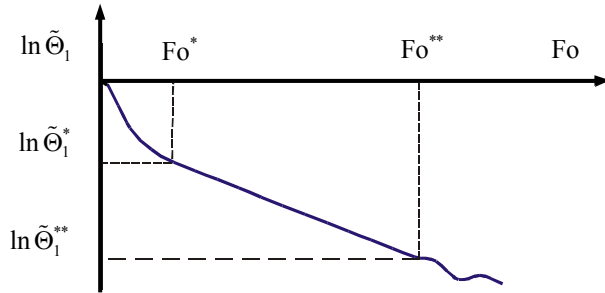


Рис. 3 График зависимости  $\ln \tilde{\Theta}_1(\text{Fo})$

где  $\bar{T}_{1,j}(\tau_j)$  – среднеинтегральная температура первого слоя, измеряемая в моменты времени  $\tau_j$ , вычисляют значения чисел Фурье  $\text{Fo}_j = a_3 \tau_j / l_4^2$ , строят график функции  $\ln \tilde{\Theta}_1(\text{Fo})$  и определяют координаты граничных точек прямолинейного участка построенного графика  $(\ln \tilde{\Theta}_1^*, \text{Fo}^*)$  и  $(\ln \tilde{\Theta}_1^{**}, \text{Fo}^{**})$ . Вычисляют первое собственное значение  $\varepsilon_1^2$  краевой задачи (13) – (16) по формуле  $\varepsilon_1^2 = [\ln \tilde{\Theta}_1^{**} - \ln \tilde{\Theta}_1^*] / [\text{Fo}^{**} - \text{Fo}^*]$ . Полученное значение  $\varepsilon_1^2$  подставляют в задачу (13) – (16) и решают ее численным методом Рунге-Кутты, подбирая значение параметра  $\beta_4$ , удовлетворяющее граничным условиям этой задачи. Искомую теплопроводность  $a_4$  вычисляют по формуле

$$a_4 = \beta_4 a_3. \quad (19)$$

Объемную теплоемкость исследуемого материала можно вычислить по формуле

$$c_4 \rho_4 = \lambda_4 / a_4. \quad (20)$$

**В третьей главе** проведен анализ возможных источников погрешностей метода измерения ТФС. Этот анализ показал, что к источникам погрешностей можно отнести: а) погрешности, вызванные невозможностью полностью выполнить допущения (температурное поле в многослойной системе считается одномерным, температура  $T_0 = \text{const}$  при  $x = \pm l_4$ , термические сопротивления на границах слоев отсутствуют, боковые утечки тепла отсутствуют), позволяющие упростить решение задач теплопроводности; б) погрешности задания ТФС слоев многослойной системы; в) погрешности измерения толщины слоев, разности температур  $\bar{T}_1 - T_0$ , объемной мощности источника теплоты  $W_1$ ; г) погрешности, возникающие при решении нестационарной задачи теплопроводности, при отбрасывании всех членов ряда (12) кроме первого; д) погрешности определения первого собственного значения  $\varepsilon_1^2$  краевой задачи (13) – (16) и численного решения задачи Штурма – Лиувилля (13) – (16).

Получены расчетные зависимости для оценки погрешностей измерения теплопроводности и температуропроводности. Среднеквадратическая оценка погрешности измерения теплопроводности вычисляется по формуле

$$(\Delta \lambda_4 / \lambda_4)_{\text{СК}} = \sqrt{[\Delta h_4 / h_4]^2 + E_1 / F_1^2}, \quad (21)$$

где

$$E_1 = \left[ \frac{\partial F_1}{\partial (\bar{T}_{1\infty} - T_0)} \Delta (\bar{T}_{1\infty} - T_0) \right]^2 + \left[ \frac{\partial F_1}{\partial W_1} \Delta W_1 \right]^2 + \left[ \frac{\partial F_1}{\partial h_1} \Delta h_1 \right]^2 + \left[ \frac{\partial F_1}{\partial h_2} \Delta h_2 \right]^2 +$$



$$+ \left[ \frac{\partial F_1}{\partial h_3} \Delta h_3 \right]^2 + \left[ \frac{\partial F_1}{\partial \lambda_1} \Delta \lambda_1 \right]^2 + \left[ \frac{\partial F_1}{\partial \lambda_2} \Delta \lambda_2 \right]^2 + \left[ \frac{\partial F_1}{\partial \lambda_3} \Delta \lambda_3 \right]^2,$$

$$F_1 = 2(\bar{T}_{1\infty} - T_0)/(W_1 h_1) - h_1/(6\lambda_1) - h_2/\lambda_2 - h_3/\lambda_3.$$

Среднеквадратическая оценка погрешности измерения теплопроводности вычисляется по формуле

$$\left( \frac{\Delta a_4}{a_4} \right)_{\text{СК}} = \sqrt{\left[ \frac{\Delta a_3}{a_3} \right]^2 + \left[ \frac{\varepsilon_1^2}{\beta_4} \right]^2 \left[ \frac{\partial \beta_4}{\partial \varepsilon_1^2} \right]^2 \left\{ E_2 + \left[ \frac{\Delta l_4}{l_4} \right]^2 + \left[ \frac{\Delta \tau}{\tau^{**} - \tau^*} \right]^2 + \left[ \frac{\Delta a_3}{a_3} \right]^2 \right\}}. \quad (22)$$

$$\text{где} \quad E_2 = \left[ (\Delta \tilde{\Theta}_1^* / \tilde{\Theta}_1^*)^2 + (\Delta \tilde{\Theta}_1^{**} / \tilde{\Theta}_1^{**})^2 \right] / \left[ \ln(\tilde{\Theta}_1^* / \tilde{\Theta}_1^{**}) \right]^2. \quad (23)$$

В формулах (22), (23) использованы следующие обозначения:  $\tau^*, \tau^{**}$  – моменты времени, которым соответствуют значения чисел Фурье  $Fo^*, Fo^{**}$ ;  $\Delta \tau$  – абсолютная погрешность измерения времени;  $\tilde{\Theta}_1^*, \tilde{\Theta}_1^{**}$  – безразмерные среднеинтегральные температуры 1-го слоя, определяемые в моменты времени, которым соответствуют значения чисел Фурье  $Fo^*, Fo^{**}$  (рис. 3).

Анализ расчетных выражений для оценки погрешности измерения теплопроводности показал, что наибольшее влияние на погрешность измерения теплопроводности оказывает погрешность измерения разности температур  $\bar{T}_{1\infty} - T_0$ . На рис. 4 представлены полученные графики зависимости  $(\Delta \lambda_4 / \lambda_4)_{\text{СК}} = f(\bar{T}_{1\infty} - T_0)$  и  $\lambda_4 = f(\bar{T}_{1\infty} - T_0)$ , из которых определен диапазон  $(\lambda_{4\text{min}} = 0,05) < \lambda_4 < (\lambda_{4\text{max}} = 0,95)$  измерения теплопроводности предложенным методом при заданном диапазоне погрешностей  $9,5\% \leq (\Delta \lambda_4 / \lambda_4)_{\text{СК}} \leq 11,5\%$ .

В результате выполненного анализа погрешностей даны следующие рекомендации. Для измерения теплопроводности с погрешностью в диапазоне

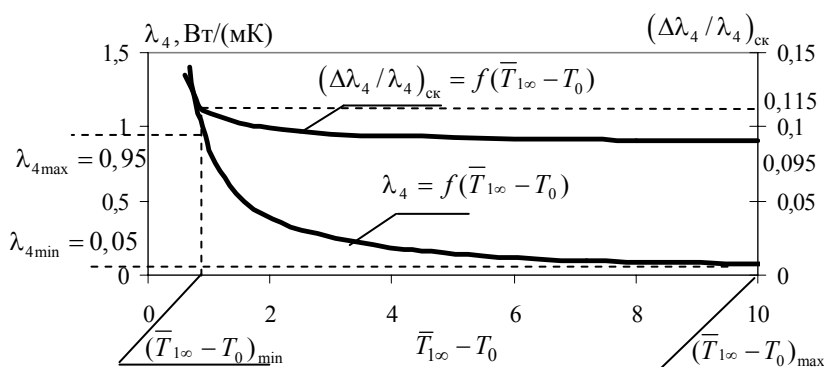


Рис. 4 К оценке погрешности измерения теплопроводности

[9,5 %; 11,5 %] необходимо, чтобы измеренная разность температур  $\bar{T}_{1\infty} - T_0$  попала в диапазон 1...10 °С. Если полученная в конце первого этапа эксперимента, разность температур не попадает в указан-

ный диапазон, то объемную мощность  $W_1$  источника теплоты следует изменить (увеличить или уменьшить) и провести повторный эксперимент.

С целью определения рационального момента окончания 1-го этапа эксперимента, т.е. момента времени, когда тепловой процесс с приемлемой точностью можно считать стационарным, а также для возможности автоматического (по команде компьютера) прекращения подвода напряжения к нагревателю ИЯ, предложено контролировать значение динамического параметра

$$\gamma = 1 - (\bar{T}_{1,j} - \bar{T}_{1,j-1}) / (\bar{T}_{1,1} - \bar{T}_{1,0}), \quad (24)$$

где  $\bar{T}_{1,0}, \bar{T}_{1,1}, \bar{T}_{1,j}, \bar{T}_{1,j-1}$  – среднеинтегральные температуры первого слоя, измеренные при  $\tau = 0$ , на первом шаге измерения, на текущем  $j$ -м и предыдущем  $(j-1)$ -м шагах измерения, соответственно.

Для определения заданного значения динамического параметра  $\gamma_3$ , при котором следует заканчивать проведение 1-го этапа эксперимента было прове-

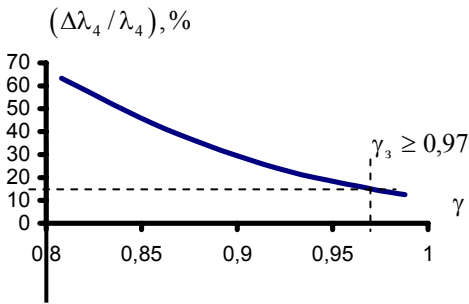


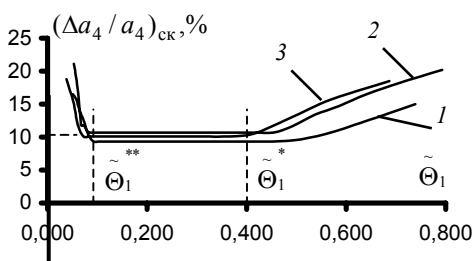
Рис. 5 График функции  $(\Delta\lambda_4/\lambda_4) = f(\gamma)$

дено численное моделирование первого этапа эксперимента. В результате этого определено (рис. 5), что при окончании первого этапа эксперимента при  $\gamma_3 = 0,97$  суммарная относительная погрешность измерения теплопроводности  $(\Delta\lambda_4/\lambda_4)$  не превысит 15 %.

показал, что погрешность измерения  $a_4$  зависит от: а) погрешностей измерения толщины слоев; б) погрешностей задания свойств слоев; в) погрешностей измерения разности температур  $\bar{T}_1 - T_0$ ; г) погрешностей определения первого собственного значения  $\varepsilon_1^2$  задачи Штурма-Лиувилля (13) – (16); д) погрешности численного решения задачи (13) – (16).

Было проведено численное моделирование температурных полей в измерительной ячейке для 2-го этапа эксперимента. В качестве свойств четвертого слоя были заданы свойства полиметилметакрилата, полистирола и текстолита. По результатам численного моделирования вычислена среднеквадратическая погрешность измерения теплопроводности и получены графики зависимости погрешности измерения теплопроводности  $(\Delta a_4/a_4)_{ск}$  полиметилметакрилата, полистирола и текстолита (кривые 1, 2 и 3 на рис. 6) от выбора граничных точек прямолинейного участка зависимости  $\ln \tilde{\Theta}_1(F_0)$ .

Результаты моделирования показали (рис. 6), что при измерении свойств веществ, теплопроводность которых лежит в диапазоне  $(0,7...1,5) \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с, суммарные погрешности  $(\Delta a_4/a_4)_{ск}$  измерения теплопроводности зависят от динамического параметра  $\tilde{\Theta}_1 = (\bar{T}_1(\tau_j) - T_0) / (\bar{T}_{1\infty} - T_0)$  и принимают наименьшие значения при значениях  $\tilde{\Theta}_1$  из диапазона  $0,4 \geq \tilde{\Theta}_1 \geq 0,1$ . Если на



втором этапе эксперимента контролировать значение динамического параметра  $\tilde{\Theta}_1$ , то при значении  $\tilde{\Theta}_1$  меньшем, чем  $\tilde{\Theta}_{13} = \tilde{\Theta}_1^{**} = 0,1$  (рациональный момент окончания 2-го этапа), второй этап следует завершить, что позволяет сократить время

$$\tilde{\Theta}_1^{**} \quad \tilde{\Theta}_1^* \quad \tilde{\Theta}_1$$

наименьших квадратов первого собственного значения  $\varepsilon_1^2$  краевой задачи Штурма-Лиувилля (13) – (16) следует использовать экспериментальные данные из диапазона  $\tilde{\Theta}_1^{**} \leq \tilde{\Theta}_1 \leq \tilde{\Theta}_1^*$ , где  $\tilde{\Theta}_1^* = 0,4$ ;  $\tilde{\Theta}_1^{**} = 0,1$ . При этом, как видно из рис. 6, относительная погрешность измерения температуропроводности не превысит 10 %.

**В четвертой главе** приведено описание технических средств, математического, алгоритмического и программного обеспечения автоматизированной установки (АУ) для измерения ТФС РП.

АУ состоит (рис. 7) из измерительной ячейки (ИЯ), жидкостного термостата 4, измерительного блока (ИБ) и персонального компьютера (ПК).

Алгоритм функционирования АУ заключается в следующем.

Исследуемые образцы одинаковых размеров помещают в ИЯ (рис. 1, 7 и 8). Включают термостат 4 (рис. 7), обеспечивающий циркуляцию воды через теплообменники ИЯ и поддержание постоянной температуры  $T_0$  на внешних поверхностях исследуемых образцов. Термометром сопротивления 3, изготовленным из медной проволоки, измеряют температуру  $T_0$ . Термометром сопротивления 2, расположенным в первом слое физической модели (рис. 1), измеряют среднеинтегральную температуру  $\bar{T}_1$  источника теплоты. Указанные термометры сопротивления, включены в мостовую измерительную схему 5, питаемую от источника питания 6, так, что выходное напряжение с мостовой схемы является функцией разности температур  $\bar{T}_1 - T_0$ . Выходной сигнал усиливается усилителем 8 и поступает на АЦП 9. ПК регистрирует изменение разности температур во времени. Соединение нагревателя 1 с блоком питания 7 контролируется ПК посредством ЦАП 10 и реле KV. В конструкции измерительной ячейки обеспечен минимальный контакт образцов РП с воздухом.

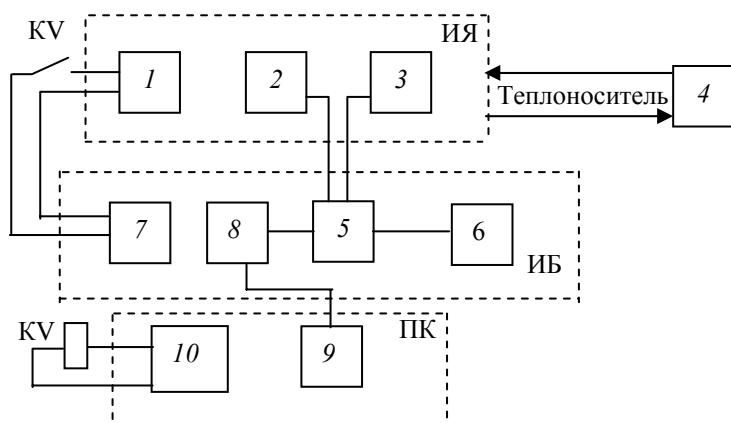
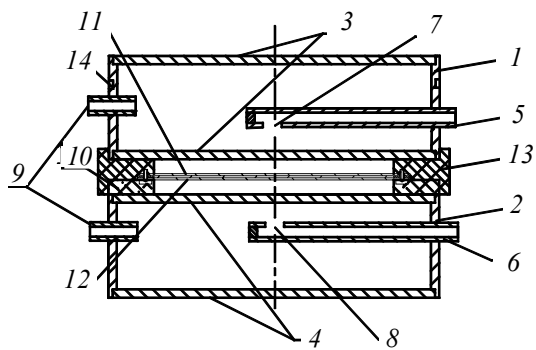


Рис. 7 Структурная схема АУ



**Рис. 8 Конструкция измерительной ячейки:**  
 1, 2 – корпуса; 3, 4 – крышки;  
 5, 6 – входные штуцера;  
 7, 8 – отверстия; 9 – выходные штуцера; 10 – кольцо нижнее;  
 11, 12 – детали, образующие слои 3, 2, 1, 2', 3' модели на рис. 1; 13 – кольцо верхнее, 14 – проточка для термометра сопротивления 3 (рис. 7)

Математическое обеспечение АУ включает математические модели стационарного и нестационарного температурных полей в ИЯ, выражения для теоретических оценок погрешностей измерения, а также вспомогательные методы, а именно, численные методы решения задачи (13) – (16) и методы математической статистики для обработки результатов измерений ТФС.

Методика измерения ТФС показана на рис. 9. Пунктиром показаны новые измерительные операции.



**Рис. 9 Методика проведения эксперимента**

В конце главы приведены алгоритмы работы программ контроля и управления ходом эксперимента и обработки экспериментальных данных.

**В пятой главе** по результатам серии экспериментов с хорошо изученными веществами (полиметилметакрилатом, текстолитом и полистиролом) получены оценки случайных погрешностей измерения ТФС, значения которых для отдельного результата измерения теплопроводности не превышают 9,5 %, температуропроводности 7,5 % (при доверительной вероятности 0,95).

Приведена методика уменьшения систематических погрешностей путем введения поправок в результаты измерения ТФС по формулам

$$\lambda_4^{\text{и}} = \lambda_4 + P_\lambda, \quad a_4^{\text{и}} = a_4 + P_a, \quad (25)$$

где  $\lambda_4^{\text{и}}, a_4^{\text{и}}$  – исправленные результаты измерения ТФС,  $\lambda_4, a_4$  – вычисленные по экспериментальным данным значения ТФС. Значения поправок  $P_\lambda, P_a$  в результаты измерения ТФС определены по данным экспериментов с хорошо изученными веществами (полиметилметакрилатом и текстолитом).

Проведено исследование изменения ТФС образцов РП в процессе регенерации. Для этого экспериментально определялось время полной отработки регенеративного продукта путем продувки через образец 1 (см. рис. 10), расположенный между пружинами 2 в обечайке 3, газовоздушной смеси (ГВС) с заданными параметрами (расход, концентрация  $\text{CO}_2$ , влажность, температура).

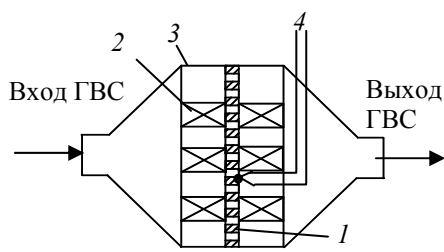


Рис. 10 Устройство подготовки образца

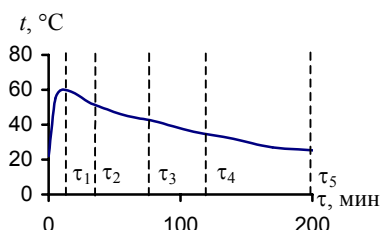


Рис. 11 К определению времени отработки регенеративного продукта

Так как в процессе отработки происходит разогрев РП, величину которого можно измерить термомпарой 4, то по снижению температуры (рис. 11) можно судить об отработке РП. Полученные данные показали, что при заданных в эксперименте параметрах ГВС время полной отработки РП в исследуемом образце составляет 200 мин. На полученном интервале (0,200) мин взято несколько точек  $\tau_i$  (рис.11) и через каждый из образцов продувалась ГВС в течение времени  $(\tau_i - \tau_{i-1}), i = \overline{1,5}$ ,  $\tau_0 = 0$ , после чего измерялись их ТФС.

Аппроксимация полученных экспериментальных данных с использованием метода наименьших квадратов показала (рис. 12) небольшую зависимость теплопроводности и температуропроводности от времени обработки РП.

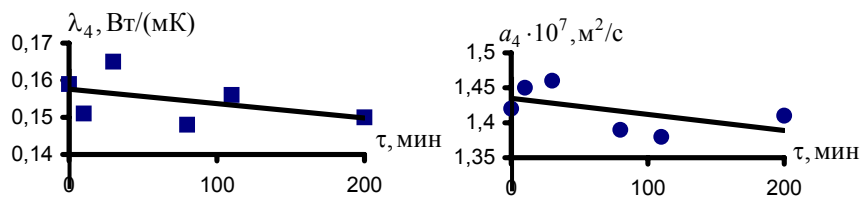


Рис. 12 Результаты исследования ТФС РП (CO<sub>2</sub>)

В заключительном параграфе пятой главы показано практическое использование результатов измерения ТФС РП для расчетов температурных полей в регенеративном патроне. Результаты таких расчетов позволили выработать рекомендации по тепловой защите изделий, содержащих РП.

**В приложениях** описана мостовая измерительная схема и схема усилителя, приведены сведения об экспериментальном определении поправок  $P_\lambda, P_a$  в результаты измерения ТФС, предложен способ определения количества теплоты, выделяемого РП в процессе обработки, приведены данные исследования ТФС РП, а также документы об использовании результатов работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1 На основании выполненного анализа требований к методу и устройству для измерения ТФС разработана физическая модель измерительной ячейки, представляющая собой симметричную плоскую многослойную систему, в центральном слое которой расположен источник теплоты. Мощность этого источника на первом этапе эксперимента постоянна, а на втором этапе – равна нулю. Для разработанной физической модели поставлены и решены стационарная и нестационарная краевые задачи теплопроводности.

2 Разработан метод, обеспечивающий повышение точности измерения ТФС образцов регенеративных продуктов за счет выбора оптимальных конструктивных параметров измерительной ячейки и режимных параметров проведения эксперимента. К оптимальным конструктивным параметрам измерительной ячейки относятся: а) симметрия разработанной физической модели, позволяющая отказаться от использования тепломеров для измерения теплового потока и использования эталонных материалов в конструкции измерительной ячейки; б) форма используемого датчика среднеинтегральной температуры, имеющего большую площадь и малую толщину, что позволяет исключить погрешности, которые могли бы возникнуть при попадании малогабаритного датчика температуры в канал исследуемого образца. К режимным параметрам разработанного метода относятся рациональная длительность этапов эксперимента, определяемая путем контроля значений предложенных динамических параметров, и рациональная мощность нагревателя измерительной ячейки, выбор которой обусловлен значением разности температур, измеренной в конце первого этапа.

3 На основе выполненного анализа определен доминирующий источник погрешности определения теплопроводности – измеряемая разность температур. Выработаны рекомендации по уменьшению погрешности определения теплопроводности, заключающиеся в изменении мощности нагревателя и повторном проведении эксперимента в случае выхода измеряемой разности температур из заданного диапазона. Определена зависимость погрешности измерения температуропроводности от динамического параметра  $\tilde{\theta}_1$ . В целях повышения точности вычисления температуропроводности при расчетах ее значений рекомендовано использовать экспериментальные данные 2-го этапа из диапазона  $0,1 \leq \tilde{\theta}_1 \leq 0,4$ .

4 Разработана автоматизированная установка для измерения ТФС образцов регенеративных продуктов. Предложено алгоритмическое обеспечение для разработанной установки, включающее алгоритмы как управления процессом измерения, так и обработки экспериментальных данных.

5 Проведены эксперименты, позволившие оценить случайные и систематические погрешности

измерения ТФС. Предложена методика, позволяющая уменьшить систематические погрешности путем введения поправок в результаты измерения.

6 Измерены теплофизические свойства РП на основе надпероксида калия. Результаты работы приняты к использованию во ФГУП ТамбовНИХИ” в рамках работ по совершенствованию конструкции регенеративных патронов с целью повышения их термостойкости. От внедрения работы получен экономический эффект на сумму 80 тыс. р. Ожидаемый экономический эффект составляет 50 тыс. р.

**Основные материалы, отражающие результаты диссертационной работы, изложены в следующих публикациях:**

1 Балабанов П.В. Математическая модель метода и устройства для измерения теплофизических свойств регенеративных веществ/ П.В. Балабанов, С.В. Пономарев, Е.С. Пономарева // Труды ТГТУ: Сб. науч. ст. Вып. 11. Тамбов, 2002. С. 13 – 16.

2 Пономарев С.В. Метод и устройство для измерения теплофизических характеристик регенеративных продуктов / С.В. Пономарев, П.В. Балабанов, Е.С. Пономарева // Измерительная техника. 2003. № 9. С. 51 – 54.

3 Пономарев С.В. Комплексное определение теплофизических характеристик материалов / С.В. Пономарев, А.В. Трофимов, П.В. Балабанов // Измерение, контроль, информатизация: Матер. Междунар. науч.-техн. конф. "ИКИ-2003". Барнаул. 2003. С. 80 – 81.

4 Пономарев С.В. Оценка погрешностей измерения теплофизических свойств твердых материалов / С.В. Пономарев, П.В. Балабанов, А.В. Трофимов // Измерительная техника. 2004. № 1. С. 44 – 47.

5 Трофимов А.В. Повышение точности измерения теплопроводности путем введения критерия управления ходом измерения / А.В. Трофимов, П.В. Балабанов // Метрология, стандартизация, сертификация и управление качеством продукции: Программа, матер. школы-семинара / ТГТУ. Тамбов, 2003. С. 137.

6 Балабанов П.В. Повышение точности измерения температуропроводности путем введения критерия управления ходом измерения // Метрология, стандартизация, сертификация и управление качеством продукции: Программа, матер. школы-семинара / ТГТУ. Тамбов, 2003. С. 93.

7 Пономарев С.В. Математическая обработка результатов при измерении теплопроводности и температуропроводности методом, аналогичным регулярному режиму первого рода / С.В. Пономарев, П.В. Балабанов // Вестник ТГТУ. 2003. Т.9. № 3. С. 382 – 390.

8 Балабанов П.В. Исследование закономерности изменения теплофизических характеристик регенеративных продуктов в процессе регенерации / П.В. Балабанов, С.В. Пономарев // VIII Науч. конф. ТГТУ: Пленар. докл. и кр. тез. Ч. 1. Тамбов, 2003. С. 73 – 74.

9 Балабанов П.В. Влияние скорости газового потока, проходящего через регенеративный продукт, на скорость хемосорбции / П.В. Балабанов, С.В. Пономарев // VIII Науч. конф. ТГТУ: Пленар. докл. и кр. тез. Ч. 1. Тамбов, 2003. С. 72 – 73.

10 Пономарев С.В. Математическое моделирование теплопереноса в процессе регенерации воздуха / С.В. Пономарев, П.В. Балабанов // XVI Межд. "Математические методы в технике и технологиях" / СПб.: Изд-во СПбГТИ (ТУ), 2003. С. 66 – 68.

11 Балабанов П.В. Задача о нахождении распределения температуры в изолированном цилиндрическом теле при воздействии внешних источников тепла / П.В. Балабанов, С.В. Пономарев // Труды ТГТУ: Сб. науч. ст. Вып. 13. Тамбов, 2003. С. 132 – 135.