

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Тамбовский государственный технический университет»

А. В. ГУРОВ, С. В. ПОНОМАРЕВ

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ПЛОСКОГО «МГНОВЕННОГО» ИСТОЧНИКА ТЕПЛОТЫ

*Рекомендовано Научно-техническим советом университета
в качестве монографии*

*Под научной редакцией доктора технических наук, профессора
С. В. Пономарева*



Тамбов

◆ Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ» ◆

2013

УДК 536.2
ББК Ж3-306.3
Г95

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
П. С. Беляев

Кандидат технических наук, научный сотрудник ТНИР «Эфир»
С. Н. Мочалин

Гуров, А. В.

Г95 Измерение теплофизических свойств теплоизоляционных материалов методом плоского «мгновенного» источника теплоты : монография / А. В. Гуров, С. В. Пономарев ; под науч. ред. С. В. Пономарева. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013. – 100 с. – 450 экз.
ISBN 978-5-8265-1230-2.

Изложены теоретические и практические аспекты принципа действия метода плоского «мгновенного» источника теплоты, разработанного для измерения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов. Сформулирована математическая модель температурного поля в образце исследуемого материала. Получены расчётные соотношения, положенные в основу разработанного метода. Определены оптимальные режимные параметры метода и рациональные конструкционные размеры измерительного устройства, обеспечивающие минимизацию погрешностей измерения искомым теплофизических свойств.

Монография будет полезна научным работникам, инженерам, аспирантам, магистрантам и студентам, специализирующимся в области проектирования, разработки и использования методов и средств измерения теплофизических свойств материалов.

УДК 536.2
ББК Ж3-306.3

ISBN 978-5-8265-1230-2

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО «ТГТУ»), 2013

ВВЕДЕНИЕ

В представленной работе приведены сведения о результатах научно-исследовательской работы, выполненной в 2011 – 2013 гг. и посвящённой разработке нового метода плоского «мгновенного» источника теплоты и измерительного устройства, предназначенных для измерения коэффициента температуропроводности a , объёмной теплоёмкости c_p и теплопроводности λ теплоизоляционных материалов.

Потребность в измерении этих трёх теплофизических свойств a , c_p и λ возникает при проведении научно-исследовательских работ, при проектировании и разработке новых технологических процессов и аппаратов, при математическом моделировании и решении задач оптимизации режимных параметров модернизируемых процессов и оборудования, а также при контроле качества продукции действующих производств.

При изложении содержания выполненных научно-исследовательских работ в монографии последовательно обсуждаются следующие результаты:

1) на основе обзора опубликованных работ принято решение об использовании метода плоского «мгновенного» источника теплоты в качестве основы выполняемых исследований, а затем сформулированы цели и задачи, которые должны быть достигнуты и решены на дальнейших этапах работы;

2) сформулирована математическая постановка и решена задача о выборе как оптимальных режимных параметров осуществления разрабатываемого метода, так и рациональных конструктивных размеров измерительного устройства;

3) разработан новый метод плоского «мгновенного» источника теплоты (для измерения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов) в виде совокупности измерительных операций и очередности их осуществления;

4) сформулированы рекомендации по выбору рационального значения основного конструктивного размера измерительного устройства для осуществления разработанного метода;

5) выполнен анализ источников погрешностей измерений теплофизических свойств теплоизоляционных материалов и указаны пути снижения влияния этих источников на результирующие погрешности метода плоского «мгновенного» источника теплоты и измерительного устройства;

6) с учётом результатов решения задачи оптимизации и выполненного анализа источников погрешностей разработана конструкция и изготовлено измерительное устройство, которое было подключено к информационно-измерительной и управляющей системе, а затем была отлажена работа экспериментальной установки;

7) разработана методика введения поправок на систематические погрешности измерения теплофизических свойств;

8) в ходе экспериментов с материалами с известными значениями теплофизических свойств (полиметилметакрилат, полистирол вспененный экструзионный «Европлэкс») была продемонстрирована работоспособность метода и измерительного устройства, подтверждена достоверность выполненных исследований, а полученные экспериментальные данные использованы при разработке алгоритма введения поправок в результаты измерения теплопроводности теплоизоляционных материалов;

9) с применением разработанного метода и изготовленной установки измерены теплофизические свойства нового материала «древосталь», а также древесины берёзы и сосны.

Представленные результаты были использованы при выполнении научно-исследовательских работ по государственному заданию Минобрнауки на 2013 г. № 7.4583.2011 «Развитие методов и средств для определения зависимости теплофизических характеристик неньютоновских жидкостей от скорости сдвига и температуры».

Авторы выражают благодарность инженеру Н. П. Муравьевой за помощь в подготовке рукописи к опубликованию.

1. ОБЗОР МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В настоящее время опубликовано [1 – 40, 49 – 57, 59 – 83, 85 – 102, 105, 106, 108 – 123, 179 – 188, 200, 201, 208, 211, 217. 218, 225 – 227] большое количество статей, монографий и учебных пособий, посвящённых вопросам экспериментального измерения теплофизических свойств веществ, материалов и изданий. В связи с тем, что данная работа посвящена разработке метода и устройства для измерения (контроля) теплопроводности, теплоёмкости и температуропроводности твёрдых теплоизоляционных материалов, нами был составлен обзор:

1) стационарных и нестационарных классических методов экспериментального измерения теплофизических свойств;

2) устройств, приборов и средств для реализации специальных методов измерения теплофизических свойств.

В соответствии с публикациями [1 – 39] к теплофизическим свойствам и характеристикам веществ относят более 50 физических величин, в число которых входят:

- теплопроводность λ ;
- удельная теплоёмкость c или объёмная теплоёмкость $c\rho$;
- коэффициент температуропроводности $a = \lambda/(c\rho)$.
- коэффициент тепловой активности $b = \sqrt{\lambda c\rho}$.

Именно эти физические величины λ , c , $c\rho$, a , b наиболее часто используют на практике для характеристики теплоизоляционных свойств веществ и материалов, причём, для характеристики теплоизоляционных свойств материалов, работающих в стационарных (установившихся во времени) режимах, обычно бывает достаточно знать значения теплопроводности λ таких веществ. Однако в случае, когда исследуемый материал предназначен для выполнения теплоизоляционных (или даже теплозащитных) функций в нестационарных условиях эксплуатации, знание значений теплопроводности λ оказывается недостаточно. При математическом моделировании и расчётах нестационарных режимов работы теплоизоляционных материалов и веществ требуется информация как минимум об объёмной теплоёмкости $c\rho$ (либо об удельной теплоёмкости c и плотности ρ). В ряде случаев вместо двух значений теплофизических величин теплопроводности λ и объёмной теплоёмкости $c\rho$ (либо вместо трёх значений λ , c , ρ) удобнее использовать

значения коэффициента температуропроводности $a = \lambda/(c\rho)$ или коэффициента тепловой активности $b = \sqrt{\lambda c\rho}$, представляющих собой комплексы из значений трёх физических величин λ , c , ρ .

В основу составленного нами обзора методов и средств измерения теплофизических свойств твёрдых теплоизоляционных материалов положена приведённая на рис. 1.1 классификация рассматриваемых методов и средств измерения, базирующаяся на идеях публикаций [1, 10, 21 – 40].

По итогам работы над обзором стало очевидно, что наиболее подходящими для измерения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов являются так называемые методы «мгновенных» источников теплоты. Рассмотрим эти методы.

1.1. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ «МГНОВЕННЫХ» ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛОТЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОМПЛЕКСА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Практическое использование рассматриваемых в этом пункте методов для измерения теплофизических свойств веществ в нашей стране началось после окончания Великой отечественной войны по инициативе академика А. В. Лыкова, работавшего в то время заведующим кафедрой физики в Московском институте химического машиностроения. В числе его учеников следует назвать М. В. Кулакова [10, 102, 131], М. А. Каганова [132], В. В. Власова [21 – 24, 105, 106], которые были в числе первых специалистов, занимавшихся применением методов «мгновенного» источника теплоты для измерения теплофизических свойств веществ.

1.1.1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ЛИНЕЙНОГО «МГНОВЕННОГО» ИСТОЧНИКА ТЕПЛОТЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Физическая модель рассматриваемого метода и устройства для его осуществления представлены [1, 10, 28, 30, 32] на рис. 1.2, *а*. Линейный нагревателем *1* изготовлен в виде тонкой проволоки диаметром $d \approx 0,1$ мм, а первичный измерительный преобразователь выполнен в виде термопары *2*, установленной на расстоянии $r_0 = 2 \dots 5$ мм от нагревателя. После подачи короткого электрического импульса постоянной мощности P длительностью $\tau_{\text{и}}$ на нагреватель *1* и выделения в нём количества теплоты $Q_{\text{л}} = P\tau_{\text{и}}$, термопара *2* регистрирует изменения температуры $T(r_0, \tau)$, представленное на рис. 1.2, *б*.

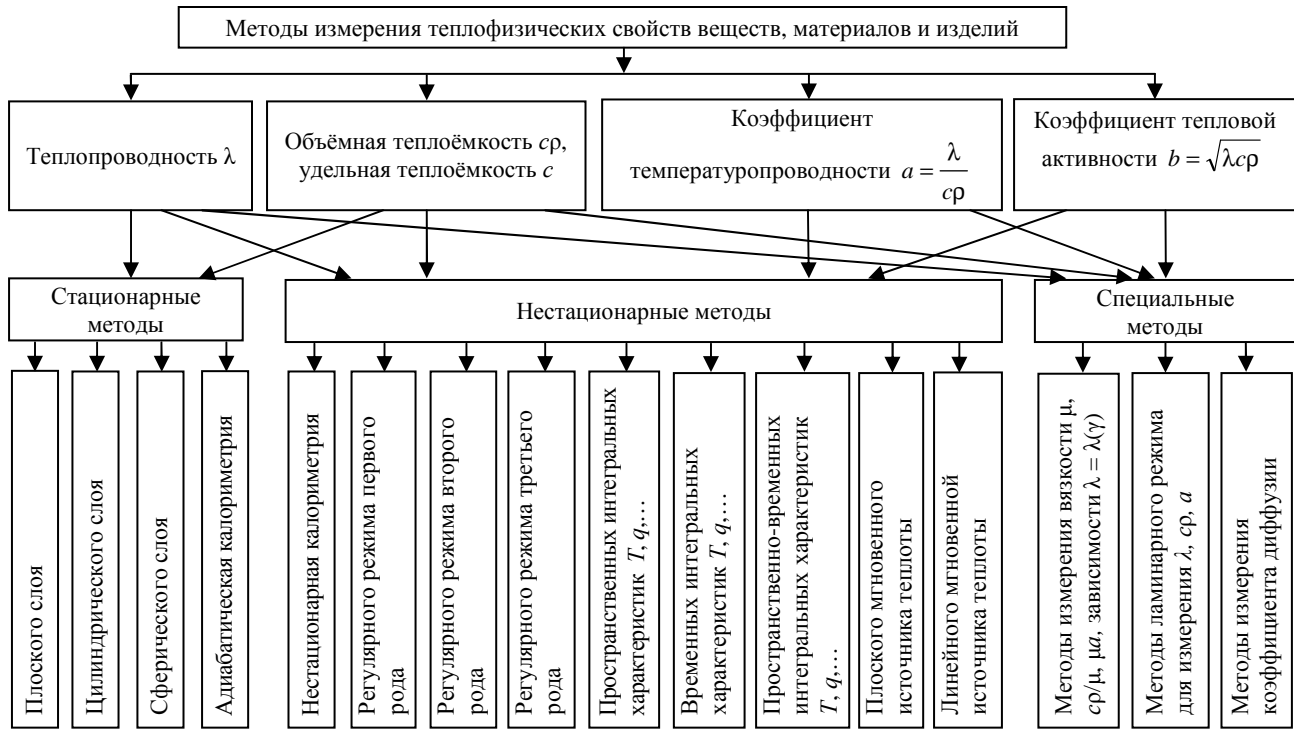
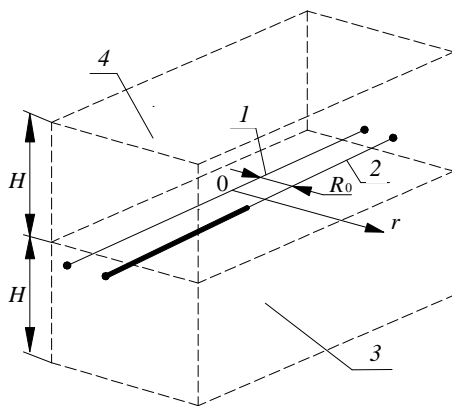
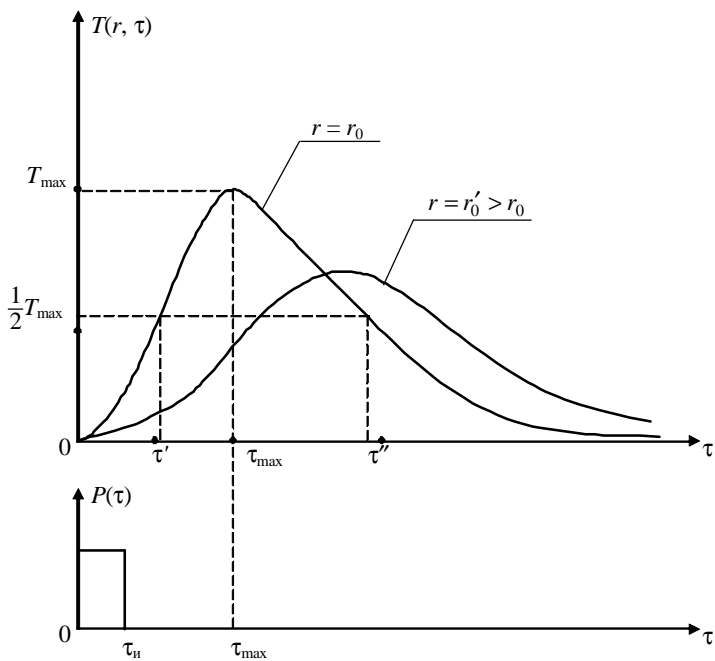


Рис. 1.1. Используемая в работе классификация методов и средств измерения теплофизических свойств веществ, материалов и изделий



a)



б)

Рис. 1.2. Осуществление метода мгновенного источника теплоты:
a – физическая модель измерительного устройства;
б – изменение температуры $T(r, \tau)$ во времени τ в сечении с координатой $r = r_0$ после «мгновенного» выделения количества теплоты $Q_{\text{и}}$ в линейном нагревателе

Математическая модель линейного «мгновенного» источника теплоты, описывающая температурное поле $T(r, \tau)$ в образце исследуемого материала, имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} c\rho \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial \tau} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda r \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right] + Q_{\text{л}} \delta(\tau) \delta(r); \\ \tau > 0, \quad 0 < r < \infty; \\ T(r, 0) &= T_0 = 0; \\ \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial r} &= 0, \quad T(\infty, \tau) = T_0 = 0, \end{aligned} \right\}$$

где $T(r, \tau)$ – температура в точке с координатой r в момент времени τ ; $c\rho$, λ – соответственно объёмная теплоёмкость и теплопроводность исследуемого вещества; T_0 – начальная температура исследуемого вещества, условно принимаемая за начало температурной шкалы в каждом эксперименте; $Q_{\text{л}}$ – количество тепла, мгновенно выделившееся в единице длины линейного нагревателя в момент начала активной стадии эксперимента; $\delta(\tau)$, $\delta(r)$ – символические δ -функции Дирака [10, 28, 30, 41 – 48, 58].

Решение этой краевой задачи имеет вид [1, 3, 7]

$$T(r, \tau) = \frac{Q_{\text{л}}}{4\pi\lambda\tau} \exp\left[-\frac{r^2}{4a\tau}\right]. \quad (1.1)$$

После преобразования решения (1.1) в публикациях [1, 10, 21 – 23, 28, 30, 32] были получены основные расчётные соотношения для вычисления искомых теплофизических свойств, а именно:

$$a = \frac{r_0^2}{4\tau_{\text{max}}}; \quad (1.2a)$$

$$c\rho = \frac{Q_{\text{л}}}{\pi e r_0^2 T_{\text{max}}}; \quad (1.2б)$$

$$\lambda = \frac{Q_{\text{л}}}{4\pi e \tau_{\text{max}} T_{\text{max}}}; \quad (1.2в)$$

$$b = \frac{Q_{\text{л}}}{2\pi e r_0 T_{\text{max}} \sqrt{\tau_{\text{max}}}}, \quad (1.2г)$$

где r_0 – расстояние от линейного «мгновенного» источника теплоты до места установки первичного измерительного преобразователя (например, термопары), измеряющего температуру $T(r_0, \tau)$ в процессе эксперимента

(см. рис. 1.2, *a*); τ_{\max} – значение момента времени (см. рис. 1.2, *б*), в котором достигается максимальное значение температуры T_{\max} на измеренной в ходе эксперимента зависимости $T(r_0, \tau)$, вид которой представлен на рис. 1.2, *б*.

Формулы (1.2а) – (1.2г) позволяют [1, 10, 28, 30, 32] по результатам одного эксперимента вычислить теплофизические свойства a , λ , c_p , b исследуемого теплоизоляционного материала с учётом измеренных значений физических величин r_0 , $Q_{\text{л}}$, T_{\max} , τ_{\max} .

При практическом осуществлении метода линейного «мгновенного» источника теплоты серьезным недостатком является то, что при обработке экспериментальных данных по формулам (1.2а) – (1.2г) приходится использовать значения моментов времени τ_{\max} , определение которых связано с большими относительными погрешностями $\delta\tau_{\max}$, достигающими иногда величин $\delta\tau_{\max} = 10 \dots 20\%$. Поэтому существенное значение имеют результаты, полученные в статье [101], в которой рассматривается постановка и решение математической задачи о выборе оптимальных режимных параметров и рациональных конструкционных размеров измерительного устройства при практическом осуществлении метода «мгновенного» линейного источника теплоты.

Значительный интерес представляют изложенные в [10] результаты исследования вопроса о введении поправок на конечную длительность $\tau_{\text{и}}$ теплового импульса, обычно постоянной мощности $P = \text{const}$, за счёт которого (см. рис. 1.2, *б*) подводится к линейному нагревателю заранее определённое количество теплоты $Q_{\text{л}} = P\tau_{\text{и}}$. В итоге выполненных исследований в монографии [10] предложено в расчётные соотношения, полученные на основе формул (1.2а) – (1.2с), вводить поправки в виде функций $\varphi_a(\tau_{\text{и}}/\tau_{\max})$, $\varphi_{c_p}(\tau_{\text{и}}/\tau_{\max})$, $\varphi_{\lambda}(\tau_{\text{и}}/\tau_{\max})$, таблицы которых приведены в [10, 28, 30].

Метод «мгновенного» линейного источника теплоты очень хорошо подходит для измерения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов по следующим причинам:

1) длительность активной стадии эксперимента обычно составляет десятки секунд и никогда не превышает нескольких минут, что позволяет проводить оперативные измерения и контроль продукции;

2) результаты исследований [101] позволяют минимизировать погрешности измерений искомых теплофизических свойств за счёт выбора оптимальных режимных параметров метода;

3) конструкция измерительного устройства является простой, легко может быть изготовлена, а за счёт выбора рациональных конструкционных размеров этого устройства (по рекомендациям [101]) есть дополнительные возможности для уменьшения суммарных погрешностей измерений;

4) обработка экспериментальных данных по простым соотношениям (в виде формул (1.2а) – (1.2в), рассмотренных выше) легко может быть реализована не только в компьютерах, но и в относительно лёгких и недорогих микроконтроллерах, что позволяет разрабатывать и использовать переносные варианты измерительных устройств.

Принимая во внимание, что современные теплоизоляционные материалы выпускаются в виде блоков плоской формы, при использовании метода линейного «мгновенного» источника теплоты возникает дополнительная погрешность, обусловленная ошибками при определении расстояния r_0 от линейного нагревателя 1 до первичного измерительного преобразователя температуры 2 , проиллюстрированная на рис. 1.3, *а*.

Видно, что при смещении первичного измерительного преобразователя 2 влево или вправо относительно осевой линии, проходящей через нагреватель 1 , фактические расстояния r'_0 и r''_0 заметно отличаются от толщины r_0 центральной части II образца, изготовленного в виде трёх частей I, II, III.

С точки зрения устранения негативного влияния этого источника погрешностей измерения r_0 более удобным является метод плоского «мгновенного» источника теплоты, предполагающий использование плоского нагревателя 3 , установленного в плоскости контакта между частями I и II используемого образца исследуемого (контролируемого) материала (см. рис. 1.3, *б*). В этом случае при смещении линейного первичного измерительного преобразователя из положения 2 в положения $2'$ или $2''$ сохраняется постоянное расстояние $x_0 = x'_0 = x''_0$ от нагревателя 3 до датчика 2 .

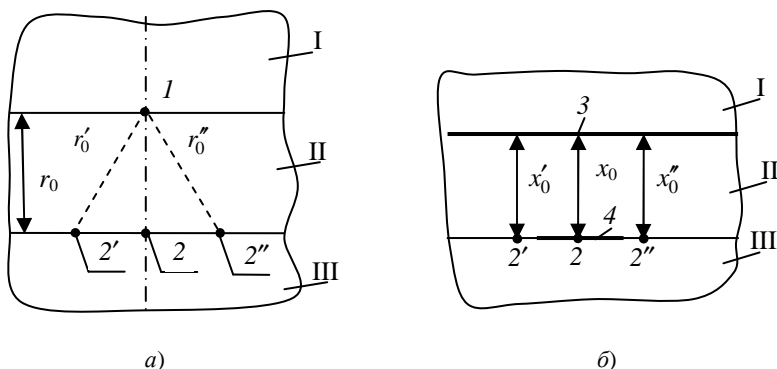


Рис. 1.3. К определению расстояний r_0 и x_0 :

а – от линейного нагревателя 1 до линейного первичного измерительного преобразователя температуры 2 ; *б* – от плоского нагревателя 3 до первичного измерительного преобразователя температуры 2

1.1.2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ПЛОСКОГО «МГНОВЕННОГО» ИСТОЧНИКА ТЕПЛОТЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Физическая модель измерительного устройства с плоским нагревателем 3, установленным в плоскости контакта частей I и II исследуемого образца, приведена на рис. 1.3, б. Применение плоского нагревателя 3 устраняет обсуждённый выше источник погрешностей определения расстояния r_0 , т.е. в случае использования декартовой системы координат расстояние x_0 от плоского нагревателя 3 до первичного измерительного преобразователя 2 практически не зависит от небольших смещений этого преобразователя 2 влево или вправо в положения 2' или 2''. Более того, появляется возможность для измерения температуры (в плоскости контакта частей II и III исследуемого образца) использовать плоский термометр сопротивления 4, изготовленный, например, из медной проволоки.

Графики, иллюстрирующие изменение температуры $T(x, \tau)$ на расстоянии x_0 от нагревателя 3 во времени τ , приведены на рис. 1.4.

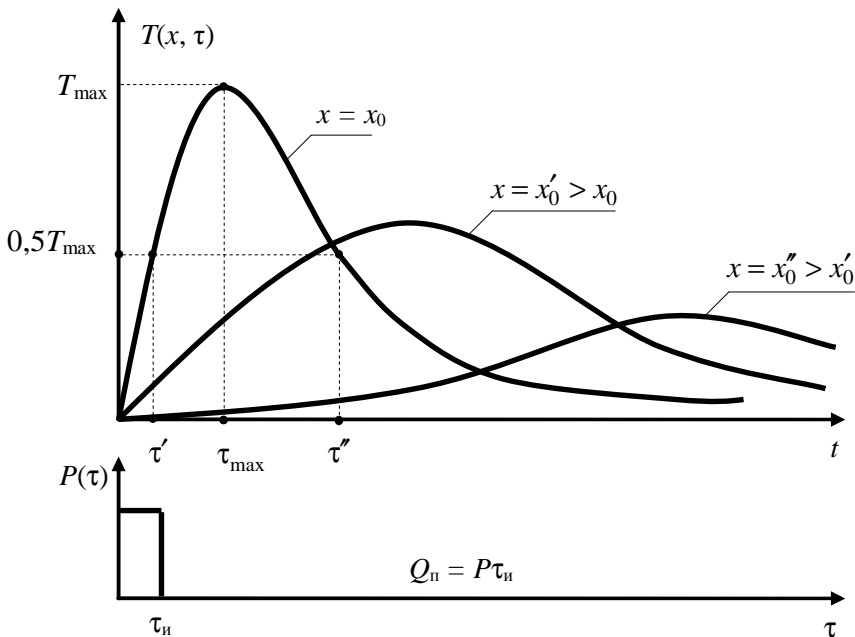


Рис. 1.4. Изменение во времени температуры $T(x, \tau)$ в точке $x = x_0$ после действия «мгновенного» источника теплоты $Q_n = P\tau_n$ при $\tau_n \rightarrow 0$

Математическая модель метода плоского «мгновенного» источника теплоты, определяющая закономерности изменения температурного поля $T(x, \tau)$ в образце исследуемого материала, записывается в виде:

$$c\rho \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right] + Q_{\text{п}} \delta(\tau) \delta(x), \quad \tau > 0, \quad -\infty < x < +\infty;$$

$$T(x, 0) = T_0 = 0;$$

$$T(-\infty, \tau) = T(+\infty, \tau) = T_0 = 0,$$

где $T(x, \tau)$ – температура в точке с координатой x в момент времени τ ; c, ρ, λ – удельная теплоёмкость, плотность и теплопроводность исследуемого вещества; T_0 – начальная температура вещества, принимаемая за начало температурной шкалы данного эксперимента ($T_0 = 0$); $Q_{\text{п}}$ – количество тепла, выделившееся в единице поверхности плоского нагревателя, Дж/м²; $\delta(\tau), \delta(x)$ – символические дельта-функции Дирака [58].

Решение этой краевой задачи теплопроводности имеет вид

$$T(x, \tau) = \frac{Q_{\text{п}}}{c\rho \sqrt{4\pi a \tau}} \exp \left[-\frac{x^2}{4a\tau} \right]. \quad (1.3)$$

На основании решения (1.18) в работах [1, 10, 28, 30, 32] были получены расчётные соотношения

$$a = \frac{x_0^2}{2\tau_{\text{max}}}; \quad (1.4a)$$

$$c\rho = \frac{Q_{\text{п}}}{T_{\text{max}} x_0 \sqrt{2\pi e}}; \quad (1.4б)$$

$$\lambda = ac\rho = \frac{Q_{\text{п}} x_0}{2\sqrt{2\pi e} \tau_{\text{max}} T_{\text{max}}}; \quad (1.4в)$$

$$b = \sqrt{\lambda c\rho} = \frac{Q_{\text{п}}}{\sqrt{4\pi e} \tau_{\text{max}} T_{\text{max}}}, \quad (1.4г)$$

используемые в качестве основы рассматриваемого традиционного метода плоского «мгновенного» источника теплоты.

Следует отметить, что при использовании рассматриваемого метода (как и ранее рассмотренного метода линейного и «мгновенного» источника теплоты) действуют следующие негативные факторы:

1) значения момента времени τ_{max} определяются со значительными относительными погрешностями $\delta\tau_{\text{max}}$, достигающими величин $\delta\tau_{\text{max}} = (10...20)\%$, что приводит к значительным погрешностям вычисления искомых теплофизических свойств по соотношениям (1.4а), (1.4в) и (1.4г);

2) на момент начала выполнения данного исследования не были опубликованы работы, посвящённые выбору оптимальных режимных параметров метода и рациональных конструкционных размеров устройства, обеспечивающих минимизацию суммарных погрешностей измерений искомым теплофизическим свойствам.

На основании изложенного выше стало понятно, что для успешного достижения целей данной работы, а именно, для снижения погрешностей измерения искомым теплофизическим свойствам теплоизоляционных материалов, необходимо поставить и решить задачу оптимизации режимных параметров метода и выбора рациональных конструкционных размеров измерительного устройства. Решение этой задачи рассмотрено в следующей главе.

1.2. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

При разработке метода и установки для измерения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов главной целью является повышение точности измерения коэффициента температуропроводности a , теплопроводности λ и объёмной теплоёмкости c_p путём совершенствования метода плоского «мгновенного» источника тепла.

Для достижения сформулированной цели необходимо было поставить и решить следующие задачи.

1. На основе обзора публикаций выбрать направления дальнейших исследований и определить содержание выполняемых работ.

2. Сформулировать математическую постановку и решить задачу о выборе оптимальных режимных параметров процесса измерения искомым теплофизическим свойствам теплоизоляционных материалов.

3. Разработать новый вариант метода плоского «мгновенного» источника теплоты для измерения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов в виде совокупности измерительных операций и очередности их осуществления.

4. Сформулировать рекомендации по выбору рациональных конструкционных размеров измерительного устройства для осуществления разработанного метода.

5. Изготовить измерительное устройство, подключить его к информационно-измерительной системе и отладить работу экспериментальной установки.

6. Путём проведения измерений теплофизических свойств материалов с известными значениями теплофизических свойств убедиться в работоспособности разработанного метода и изготовленной экспериментальной установки, при необходимости разработать методику введения поправок на систематические погрешности измерений.

7. С применением разработанного метода и изготовленной установки осуществить измерения теплофизических свойств новых материалов с ранее неизвестными значениями коэффициента температуропроводности и теплопроводности.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДА ПЛОСКОГО «МГНОВЕННОГО» ИСТОЧНИКА ТЕПЛОТЫ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЕГО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ

В данной главе рассматриваются следующие вопросы:

- теоретический, экспериментальный и теоретико-экспериментальный подходы к решению задач оптимизации режимных параметров метода и конструкционных размеров измерительного устройства;
- решение задачи выбора оптимальных режимных параметров метода и рациональных конструкционных размеров измерительного устройства;
- анализ источников погрешностей измерения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов и выработки рекомендаций по снижению их влияния;
- рекомендации по разработке методики введения поправок на систематические погрешности измерения теплофизических свойств веществ.

2.1. ВОЗМОЖНЫЕ ПОДХОДЫ К ВЫБОРУ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАЗРАБАТЫВАЕМОГО МЕТОДА И РАЦИОНАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ РАЗМЕРОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЯЧЕЙКИ

На основе обзора публикаций [10, 26 – 30, 40, 66 – 70, 74, 101, 118, 152, 185, 186, 200, 217] и накопленного опыта разработки методов устройств для теплофизических измерений можно сформулировать три главных варианта возможных подходов к выбору оптимальных режимных параметров разрабатываемых методов и рациональных конструкционных размеров измерительных ячеек, рассмотренные ниже.

1. Чисто теоретический подход, предусматривающий постановку математической задачи оптимизации и её решение с использованием известных методов решения таких задач [212 – 216]. Примеры постановки и решения задач выбора оптимальных режимных параметров и рациональных конструкционных размеров измерительных устройств в теплофизических измерениях рассмотрены в публикациях [27, 29, 30, 40, 66 – 70, 101, 118, 141 – 143, 149, 152, 154, 183, 185, 186, 200, 201, 217]. Недостатком чисто теоретического подхода является невозможность учесть в математической постановке задачи все детали и особенности процесса измерения и измерительного устройства.

2. Осуществление экспериментальных исследований, например, путём проведения измерений теплофизических свойств эталонных мате-

риалов и веществ (с известными теплофизическими свойствами) и выбор оптимальных режимных параметров используемого метода и рациональных конструкционных параметров применяемого измерительного устройства на основе полученных экспериментальных данных. Во многих случаях такой подход может казаться привлекательным (особенно для исследователей, предпочитающих работать без применения математики), так как он позволяет обойтись без постановки и решения математической задачи оптимизации. Для успешного применения такого подхода необходимо очень глубоко понимать физические основы метода измерений и на интуитивном уровне чувствовать от каких наблюдаемых в ходе эксперимента параметров зависят и могут контролироваться (выбираться, управляться) оптимальные режимные параметры процесса измерений. Можно утверждать, что рассматриваемый экспериментальный подход на практике требует больших затрат финансовых, материальных, человеческих и временных ресурсов, причём, во многих случаях не приводит к получению ответов на поставленные вопросы оптимизации.

3. Наиболее правильным и успешно приводящим к цели является теоретико-экспериментальный подход, предусматривающий сочетание двух перечисленных выше подходов. Согласно этому подходу для достижения поставленной цели оптимизации следует действовать следующим образом:

а) сначала надо поставить и решить задачу оптимизации как режимных параметров метода измерения, так и конструкционных размеров измерительного устройства; при этом надо не забывать, что полученные решения не совсем точны, так как при постановке математической задачи оптимизации был принят ряд допущений, позволивший упростить формулировку задачи, но не позволяющий учесть все особенности рассматриваемого процесса; в результате выполнения этого начального этапа работы появляются ориентировочные значения режимных параметров метода и конструкционных размеров измерительного устройства;

б) на втором этапе работы надо изготовить измерительное устройство и путём проведения экспериментальных измерений с веществами и материалами с известными теплофизическими свойствами оценить реальные погрешности измерений и сделать выводы о практической возможности использования полученных на предыдущем этапе теоретических рекомендаций по выбору оптимальных режимных параметров метода и рациональных конструкционных размеров измерительного устройства; следует отметить, что объём экспериментальных исследований в случае использования третьего теоретико-экспериментального подхода удается значительно сократить по сравнению со случаем применения второго чисто экспериментального подхода, так как значительно сокращаются диапазоны изменения параметров проведения экспериментов (их примерные значения уже известны из решения математической задачи оптимизации);

в) на следующем этапе (в зависимости от того, какие результаты были получены на предыдущей экспериментальной стадии работы) можно рекомендовать следующее:

– если результаты измерений, полученные с использованием эталонных материалов, содержат значительные систематические погрешности, то следует разработать методику введения поправок на эти экспериментально выявленные систематические погрешности, а затем включить эту методику в состав программного обеспечения применяемой ИИУС;

– если результаты экспериментальных измерений теплофизических свойств эталонных веществ и материалов свидетельствуют о необходимости внести коррекции в ранее определённые теоретически значения оптимальных режимных параметров метода или конструкционных размеров измерительной ячейки, то надо внести эти изменения в программное обеспечение ИИУС, в составе которой будет применяться разработанный метод и измерительная ячейка.

2.2. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА К ВЫБОРУ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ МЕТОДОМ ПЛОСКОГО «МГНОВЕННОГО» ИСТОЧНИКА ТЕПЛОТЫ

Целью изложенных ниже результатов является выбор оптимальных режимных параметров измерительных операций и конструкционных размеров устройства для проведения измерений комплекса теплофизических свойств вещества методом плоского «мгновенного» источника теплоты.

2.2.1. ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕТОДА И УСТРОЙСТВА

На рисунке 2.1 приведена физическая модель устройства для осуществления метода плоского «мгновенного» источника теплоты.

При практической реализации рассматриваемого в данном параграфе метода на плоский нагреватель I подаётся короткий электрический импульс, за время действия которого в единице площади этого нагревателя выделяется количество теплоты $Q_{\text{п}}$. На практике длительность $\tau_{\text{и}}$ импульса приходится выбирать достаточно большой, чтобы с необходимой точностью зарегистрировать измеряемую температуру $T(x_0, \tau)$. Вопросы введения поправок на конечную длительность $\tau_{\text{и}}$ теплового импульса в приведённые ниже расчётные зависимости (2.2), (2.7а) рассмотрены в [10, 28, 30]. При условии, что длительность импульса $\tau_{\text{и}} < (0,05 \dots 0,1)\tau_{\text{max}}$, т.е. много меньше промежутка времени до момента времени τ_{max} достижения максимума на температурной кривой (рис. 2.2), эти поправки остаются достаточно небольшими [10, 28, 30], что позволяет использовать на практике рассматриваемый метод (без введения поправок).

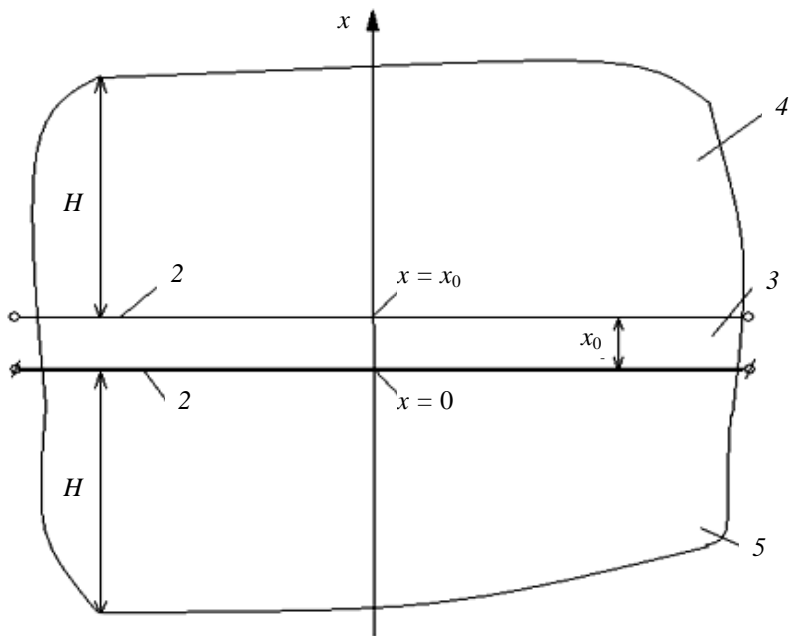


Рис. 2.1. Физическая модель устройства для реализации метода плоского «мгновенного» источника тепла [28, 30, 201]:

x_0 – расстояние между плоским нагревателем 1 и измерителем температуры 2;
3, 4, 5 – образцы исследуемого материала

2.2.2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И РАСЧЁТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ

При построении математической модели рассматриваемого метода, использованной при выводе расчётных соотношений, были приняты следующие допущения и предположения.

1. Исследуемый теплоизоляционный материал является однородным и изотропным, в нём отсутствуют посторонние включения или полости (каверны).

2. Теплофизические свойства (коэффициент температуропроводности, объёмная теплоёмкость, теплопроводность) исследуемого теплоизоляционного материала не зависят от температуры и их можно считать постоянными.

3. Можно пренебречь геометрическим размером (толщиной) и собственной теплоёмкостью плоского нагревателя, используемого для подвода постоянного количества теплоты Q_n к единице поверхности исследуемого материала при $x = 0$.

4. Первичный измерительный преобразователь – термopapa – является достаточно тонкой для того, чтобы можно было пренебречь её геометрическими размерами и её собственной теплоёмкостью.

5. Наиболее важные поверхности контакта составных частей (элементов), из которых набирается образец исследуемого материала, обработаны с высокой точностью с точки зрения обеспечения их малых отклонений от требуемой плоскостности.

6. Малые отклонения от плоскостности и обеспечение постоянной силы прижатия позволяют пренебречь тепловыми сопротивлениями на поверхностях контакта составных частей образца исследуемого материала между собой, а также с плоским нагревателем и с первичным измерительным преобразователем в виде термopapa.

7. Продолжительность τ_n теплового импульса, обеспечивающего подвод постоянного количества теплоты Q_n к единице поверхности плоского нагревателя, установленного в исследуемом материале при $x = 0$, является достаточно малой, что позволяет пренебречь его длительностью и считать, что при $x = 0$ в момент времени $\tau = 0$ подействовал внутренний источник теплоты вида $Q_n \delta(\tau) \delta(x)$.

С учётом изложенных выше допущений и предположений, математическая модель метода плоского «мгновенного» источника теплоты записывается в виде краевой задачи теплопроводности [28 – 30]:

$$c\rho \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right] + Q_n \delta(\tau) \delta(x), \quad \tau > 0, \quad -\infty < x < +\infty;$$

$$T(x, 0) = T_0 = 0;$$

$$T(-\infty, \tau) = T(+\infty, \tau) = T_0 = 0,$$

где $T(x, \tau)$ – температура в точке с координатой x в момент времени τ ; c, ρ, λ – удельная теплоёмкость, плотность и теплопроводность исследуемого вещества; T_0 – начальная температура вещества, принимаемая за начало температурной шкалы данного эксперимента ($T_0 = 0$); Q_n – количество тепла, выделившееся в единице поверхности плоского нагревателя, Дж/м²; $\delta(\tau), \delta(x)$ – символические дельта-функции Дирака [28 – 30, 58].

Исходя из приведённой математической модели данного метода можно получить решение, которое имеет следующий вид

$$T(x, \tau) - T_0 = \frac{Q_n}{c\rho \sqrt{4\pi a \tau}} \exp\left[-\frac{x^2}{4a\tau}\right]. \quad (2.1)$$

В [1, 10, 28, 30, 32] показано, что определение температуропроводности обычно осуществляется с использованием формулы

$$a = \frac{x_0^2}{2\tau_{\max}}, \quad (2.2)$$

где τ_{\max} – момент времени, в который достигается максимальное значение температуры T_{\max} .

Использование формулы (2.2) приводит к большим погрешностям, поскольку сложно достаточно точно определить значение момента времени τ_{\max} . Попробуем определить такие моменты времени τ' и τ'' , используя которые (см. рис. 2.2) можно минимизировать погрешность определения температуропроводности.

Для этого измерим в точке с координатой x изменение во времени τ температуры $T(x, \tau) - T_0$ и зарегистрируем эту кривую (рис. 2.2).

Введём безразмерную переменную $z = \frac{x^2}{4a\tau}$. Тогда решение (2.1)

примет вид

$$\begin{aligned} T(x, \tau) - T_0 &= \frac{Q_n}{c\rho\sqrt{4\pi a\tau}} \exp\left[-\frac{x^2}{4a\tau}\right] = \\ &= \frac{Q_n}{c\rho\sqrt{\pi x^2 \frac{4a\tau}{x^2}}} \exp\left(-\frac{x^2}{4a\tau}\right) = \frac{Q_n\sqrt{z} \exp(-z)}{c\rho x\sqrt{\pi}}, \end{aligned}$$

где $c\rho = \frac{\lambda}{a}$ – объёмная теплоёмкость исследуемого материала.

Введём переменный параметр

$$\beta = \frac{T(r, \tau) - T_0}{T_{\max} - T_0}, \quad (2.3)$$

где T_0 – начальная температура исследуемого вещества, условно принимаемая за начало температурной шкалы в каждом эксперименте; T_{\max} – максимальное значение температуры, достигаемое в ходе эксперимента в момент времени τ_{\max} .

Запишем решение (2.1) для момента времени $\tau' = \tau'(\beta)$:

$$T(x, \tau') - T_0 = \frac{Q_n\sqrt{z(\tau'(\beta))} \exp(-z(\tau'(\beta)))}{c\rho x\sqrt{\pi}}. \quad (2.1a)$$

Для момента времени $\tau = \tau_{\max}$, когда, согласно [28, 30], $z|_{\tau_{\max}} = \frac{1}{2}$, получаем

$$T(x, \tau_{\max}) - T_0 \equiv T_{\max} - T_0 = \frac{Q_{\text{п}} \sqrt{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{1}{2}\right)}{c\rho x \sqrt{\pi}} = \frac{Q_{\text{п}}}{c\rho x \sqrt{2\pi e}}. \quad (2.16)$$

Поделив (2.1а) на (2.1б), получаем

$$\beta = \frac{T(x, \tau'(\beta)) - T_0}{T_{\max} - T_0} = z^{-\frac{1}{2}} \exp[-z] \sqrt{2e}. \quad (2.4)$$

Преобразовав выражение (2.4), получаем уравнение

$$\sqrt{z} \exp(-z) = \frac{\beta}{\sqrt{2e}}. \quad (2.5)$$

Обозначим $z' = z(\tau'(\beta))$ и $z'' = z(\tau''(\beta))$ соответственно больший и меньший корни уравнения (2.5). После преобразований легко получаем формулы для вычисления искомой температуропроводности a по экспериментально измеренным значениям моментов времени τ' и τ'' :

$$\text{из } z' = z(\tau'(\beta)) = \frac{x^2}{4a\tau'} \text{ следует, что } a = \frac{x^2}{4z'\tau'}; \quad (2.6)$$

$$\text{из } z'' = z(\tau''(\beta)) = \frac{x^2}{4a\tau''} \text{ следует, что } a = \frac{x^2}{4z''\tau''}, \quad (2.6a)$$

где τ' и τ'' – меньший и больший моменты времени, соответствующие большему z' и меньшему z'' корням уравнения (2.5), при которых достигается заданное значение параметра β , определённое формулой (2.3).

Для вычисления объёмной теплоёмкости $c\rho$ на основе зависимости (2.1а) легко получается формула:

$$c\rho = \frac{Q_{\text{п}} \sqrt{z(\tau'(\beta))} \exp(-z(\tau'(\beta)))}{[T(x, \tau'(\beta)) - T_0] x \sqrt{\pi}}, \quad (2.7)$$

которая при $z|_{\tau_{\max}} = \frac{1}{2}$, с учётом (2.1б) принимает вид:

$$c\rho = \frac{Q_{\text{п}}}{[T_{\max} - T_0] x \sqrt{\pi}}, \quad (2.7a)$$

2.2.3. ВЫВОД СООТНОШЕНИЙ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ

По методике, описанной в [27, 201, 209], легко получить выражение для вычисления погрешностей для случая определения (вычисления) температуропроводности по формулам (2.6) и (2.6а).

На основании (2.6) получено следующее выражение:

$$\delta a = \sqrt{4(\delta x)^2 + (\delta z')^2 + (\delta \tau')^2}, \quad (2.8)$$

где $\delta a = \frac{\Delta a}{a}$ – среднеквадратическая оценка относительной погрешности измерения температуропроводности; $\delta x = \frac{\Delta x}{x}$ – относительная погрешность определения расстояния x между нагревателем и измерителем температуры; $\delta z' = \frac{\Delta z'}{z'}$ – относительная погрешность определения величины z' ; $\delta \tau' = \frac{\Delta \tau'}{\tau'}$ – относительная погрешность определения момента времени τ' ; $\Delta a, \Delta x, \Delta z', \Delta \tau'$ – абсолютные погрешности измерения (определения) величин a, x, z', τ' .

Определим составляющую погрешности $\delta z'$

$$\delta z' \approx \frac{dz'}{z'} = \frac{1}{z'} \frac{dz'}{d\beta} d\beta \approx \frac{1}{z'} \frac{dz'}{d\beta} \Delta \beta.$$

Аналогично определим абсолютную погрешность $\Delta \beta$ по методике, изложенной в [27, 201, 209]. Учитывая, что β рассчитывается по формуле (2.3), получаем

$$\Delta \beta = \beta \sqrt{\delta^2(T(x, \tau') - T_0) + \delta^2(T_{\max} - T_0)}, \quad (2.9)$$

где $\delta(T(x, \tau') - T_0) = \frac{\Delta(T(x, \tau') - T_0)}{T(x, \tau') - T_0}$; $\delta(T_{\max} - T_0) = \frac{\Delta(T_{\max} - T_0)}{T_{\max} - T_0}$ – относительные погрешности измерений разностей температур $\delta(T(x, \tau') - T_0)$ и $\delta(T_{\max} - T_0)$.

Предполагая, что $\Delta(T(x, \tau') - T_0) = \Delta(T_{\max} - T_0) = \Delta T$, после преобразования (2.9) получаем

$$\Delta \beta = \beta \delta(T_{\max} - T_0) \sqrt{\frac{1}{\beta^2} + 1}, \quad (2.9a)$$

откуда следует

$$\delta z' = \frac{1}{z'(\beta)} \frac{dz'(\beta)}{d\beta} \beta \delta T_{\max} \sqrt{\frac{1}{\beta^2} + 1},$$

где использовано обозначение $\delta T_{\max} \equiv \delta(T_{\max} - T_0)$.

Повторив изложенное выше, легко получаем, что

$$\delta z'' = \frac{1}{z''(\beta)} \frac{dz''(\beta)}{d\beta} \beta \delta T_{\max} \sqrt{\frac{1}{\beta^2} + 1}.$$

Определим входящую в (2.8) составляющую $\delta\tau'$, поскольку ясно, что эта составляющая не представляет собой просто число, а изменяется во времени даже при постоянной абсолютной погрешности ΔT измерения температуры.

Погрешности определения моментов времени τ_{\max} , τ' и τ'' связаны не только непосредственно с измерением времени (см. рис. 2.2)

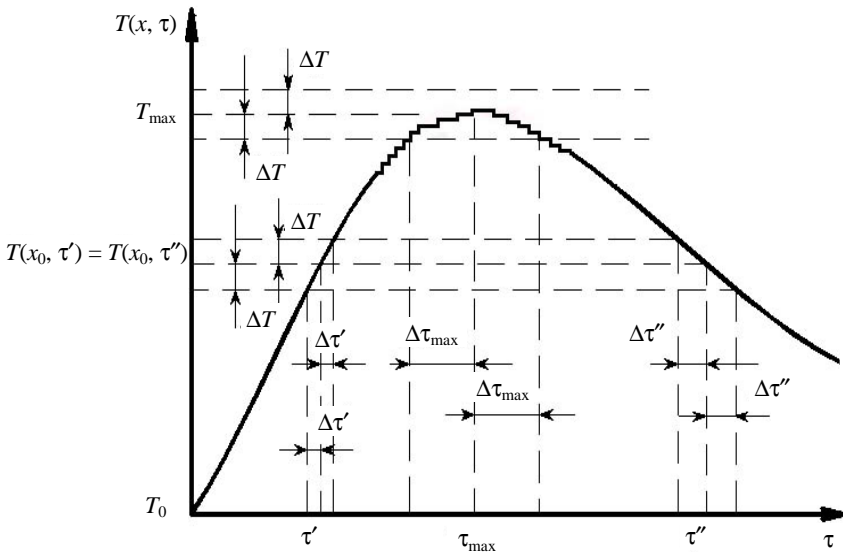


Рис. 2.2. Изменение во времени τ температуры $[T(x, \tau) - T_0]$ в плоскости с координатой x и иллюстрация неопределенности абсолютной погрешности $\Delta\tau$ определения времени при постоянной абсолютной погрешности ΔT измерения температуры [201]

Рисунок 2.2 наглядно иллюстрирует следующее. В реальных условиях эксперимента пик кривой, соответствующий максимуму температуры, заметно зашумлен и поэтому существенно размыт. Если определение значения максимальной температуры T_{\max} можно провести достаточно точно, то соответствующий момент времени τ_{\max} определяется с заметно большей погрешностью $\Delta\tau_{\max}$.

Определение моментов времени τ' и τ'' осуществляется через определение температуры, поэтому погрешность определения этих моментов времени можно выразить через погрешность определения температуры. Учитывая, что

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} \approx \frac{\Delta T}{\Delta \tau}, \text{ получаем } \Delta\tau' \approx \frac{\Delta T}{\left(\frac{\partial T(x, \tau(\beta))}{\partial \tau} \right) \Big|_{\tau=\tau'}}; \quad (2.10)$$

$$\Delta\tau'' \approx \frac{\Delta T}{\left(\frac{\partial T(x, \tau(\beta))}{\partial \tau} \right) \Big|_{\tau=\tau''}}, \quad (2.10a)$$

Из формулы (2.10) следует, что абсолютная погрешность $\Delta\tau'$ определения момента времени τ' , зависит от абсолютной погрешности ΔT измерения температуры $T(x, \tau'(\beta))$ и от производной $\left(\frac{\partial T(x, \tau(\beta))}{\partial \tau} \right)$ в момент времени τ' . При этом значения производной $\left(\frac{\partial T(x, \tau(\beta))}{\partial \tau} \right)$ и погрешности $\Delta\tau'(\beta)$ зависят от выбора конкретного значения безразмерного параметра $\beta = \frac{T(x, \tau') - T_0}{T_{\max} - T_0}$, представляющего собой отношение разностей температур $(T(x, \tau') - T_0)$ и $(T_{\max} - T_0)$. Если предположить, что абсолютные погрешности измерения температур $\Delta(T_{\max} - T_0) = \Delta(T(x, \tau') - T_0) = \Delta T = \text{const}$ остаются постоянными, то с учётом (2.10) получим соотношения:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\tau'}{\tau'} = \delta\tau' &= \frac{\Delta T}{\tau' \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} \right) \Big|_{\tau'}} = \frac{(T_{\max} - T_0) \delta T_{\max}}{\tau' \left(\frac{\partial T(x, \delta(\beta))}{\partial \tau} \right) \Big|_{\tau=\tau'}}; \\ \frac{\Delta\tau''}{\tau''} = \delta\tau'' &= \frac{\Delta T}{\tau'' \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} \right) \Big|_{\tau''}} = \frac{(T_{\max} - T_0) \delta T_{\max}}{\tau'' \left(\frac{\partial T(x, \delta(\beta))}{\partial \tau} \right) \Big|_{\tau=\tau''}}, \end{aligned} \quad (2.10б)$$

где принято во внимание, что $\Delta T = (T_{\max} - T_0) \delta T_{\max}$.

Значения производных $\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau}$ для моментов времени τ' и τ'' [201]:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial [T(x, \tau') - T_0]}{\partial \tau} \right|_{\tau=\tau'} &= \frac{Q_{\Pi}}{c\rho x \tau' \sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{x^2}{4a\tau}} \exp\left(-\frac{x^2}{4a\tau}\right) \left(\frac{x^2}{4a\tau} - \frac{1}{2}\right) = \\ &= \frac{Q_{\Pi} \sqrt{z'} \exp(-z') \left(z' - \frac{1}{2}\right)}{c\rho x \tau' \sqrt{\pi}}; \\ \left. \frac{\partial [T(x, \tau'') - T_0]}{\partial \tau} \right|_{\tau=\tau''} &= \frac{Q_{\Pi} \sqrt{z''} \exp(-z'') \left(z'' - \frac{1}{2}\right)}{c\rho x \tau'' \sqrt{\pi}}, \end{aligned}$$

а для момента времени τ_{\max} , когда $z|_{\tau_{\max}} = \frac{1}{2}$:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} \right|_{\tau=\tau_{\max}} &= 0; \\ T_{\max} - T_0 &= \frac{Q_{\Pi}}{c\rho x \sqrt{2\pi e}}. \end{aligned} \quad (2.16)$$

С учётом (2.16) получаем:

$$\begin{aligned} \frac{T_{\max} - T_0}{\left. \frac{\partial [T(x, \tau') - T_0]}{\partial \tau} \right|_{\tau=\tau'}} &= \frac{\tau' \sqrt{\pi}}{\sqrt{2\pi e} \sqrt{z'} \exp(-z') \left(z' - \frac{1}{2}\right)} = \\ &= \frac{\tau'}{\sqrt{2e} \sqrt{z'(\beta)} \exp(-z'(\beta)) \left(z'(\beta) - \frac{1}{2}\right)}; \\ \delta\tau' &= \frac{\Delta\tau'}{\tau'} = \frac{(T_{\max} - T_0) \delta T_{\max}}{\tau' \left. \frac{\partial [T(x, \tau') - T_0]}{\partial \tau} \right|_{\tau=\tau'}} = \frac{\delta T_{\max}}{\sqrt{2e} \sqrt{z'(\beta)} \exp(-z'(\beta)) \left(z'(\beta) - \frac{1}{2}\right)}. \end{aligned}$$

Действуя аналогично, получаем:

$$\delta\tau'' = \frac{\Delta\tau''}{\tau''} = \frac{(T_{\max} - T_0) \delta T_{\max}}{\tau'' \left. \frac{\partial [T(x, \tau'') - T_0]}{\partial \tau} \right|_{\tau=\tau''}} = \frac{\delta T_{\max}}{\sqrt{2e} \sqrt{z''(\beta)} \exp(-z''(\beta)) \left(z''(\beta) - \frac{1}{2}\right)}.$$

В итоге получаем следующие формулы [201]:

$$\begin{aligned}
 (\delta a)' &= \sqrt{4(\delta x)^2 + \left[\frac{\delta T_{\max}}{\sqrt{2e} \sqrt{z'(\beta)} \exp(-z'(\beta)) \left(z'(\beta) - \frac{1}{2} \right)} \right]^2} + \\
 &\rightarrow \left[\frac{1}{z'(\beta)} \frac{dz'(\beta)}{d\beta} \beta \right]^2 \left(1 + \frac{1}{\beta^2} \right) (\delta T_{\max})^2; \\
 (\delta a)'' &= \sqrt{4(\delta x)^2 + \left[\frac{\delta T_{\max}}{\sqrt{2e} \sqrt{z''(\beta)} \exp(-z''(\beta)) \left(z''(\beta) - \frac{1}{2} \right)} \right]^2} + \\
 &\rightarrow \left[\frac{1}{z''(\beta)} \frac{dz''(\beta)}{d\beta} \beta \right]^2 \left(1 + \frac{1}{\beta^2} \right) (\delta T_{\max})^2.
 \end{aligned}$$

По аналогии с изложенным выше, на основе формулы (2.7) была получена зависимость для вычисления среднеквадратической оценки относительной погрешности измерения объёмной теплоёмкости

$$(\delta_{cp})' = \sqrt{(\delta Q_n)^2 + (\delta x)^2 + (\delta [T(x, \tau') - T_0])^2 + \left(\frac{1}{2z'(\beta)} \frac{dz'(\beta)}{d\beta} \beta \right)^2 + \left(\frac{dz'(\beta)}{d\beta} \beta \right)^2}.$$

Принимая во внимание, что на основании (9а) $\delta\beta = \frac{\Delta\beta}{\beta} =$
 $= \delta T_{\max} \sqrt{\frac{1}{\beta^2} + 1}$, а $\delta [T(x, \tau') - T_0] = \frac{\delta T_{\max}}{\beta}$, получаем, что

$$(\delta_{cp})' = \sqrt{(\delta Q_n)^2 + (\delta x)^2 + (\delta T_{\max})^2 \left[\frac{1}{\beta^2} + (1 + \beta^2) \left(\frac{dz'(\beta)}{d\beta} \right)^2 \left(\frac{1}{4(z')^2} + 1 \right) \right]}, \quad (2.11)$$

где δQ_n – относительная погрешность измерения количества теплоты Q_n , которое мгновенно выделяется в единице площади плоского нагревателя; δT_{\max} – относительная погрешность измерения разности температур ($T_{\max} - T_0$); δx – относительная погрешность измерения расстояния x между плоским нагревателем 1 и измерителем температуры 2 (рис. 2.1).

2.2.4. ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ, ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ МЕТОДА И РАЦИОНАЛЬНОГО КОНТРОЛЬНОГО РАЗМЕРА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

По полученным формулам были рассчитаны среднеквадратичные погрешности (см. рис. 2.3 и 2.4) для различных значений β , Q_n , x и выбранные оптимальные параметры, обеспечивающие наименьшую погрешность.

При выполнении расчётов были использованы следующие значения: $a = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, $c_p = 162\,000 \text{ Дж}/(\text{м}^3\text{К})$, $Q_n = 55\,000 \text{ Вт}\cdot\text{с}/\text{м}^2$, $\Delta Q_n = 500 \text{ Вт}\cdot\text{с}/\text{м}^2$, $x = 2 \dots 8 \text{ мм}$, $\Delta x = 0,1 \text{ мм}$, $\Delta T_{\max} = 0,01 \text{ }^\circ\text{C}$. Примеры зависимости среднеквадратических погрешностей $\delta a'$, $\delta(c_p)$ от параметра β при $x = 4 \text{ мм}$ и $Q_n = 55\,000 \text{ Вт}\cdot\text{с}/\text{м}^2$ приведены на рис. 2.3, 2.4.

Как видно из графика, приведённого на рис. 2.3, оптимальные значения β (для измерения температуропроводности a) находятся в диапазоне 0,3 – 0,6. После проведения расчётов при изменении β с шагом 0,001 было определено минимальное значение погрешности в соответствующее ему значение β , равные [201]:

$$\delta a' = 5,08 \% \text{ при } \beta = 0,498 \approx 0,5 .$$

В процессе выполнения данного исследования стало очевидно, что наряду с выбором оптимального значения параметра $\beta = \beta_{\text{opt}} \approx 0,5$, следует определить величину расстояния x , при котором погрешность измерения температуропроводности будет минимальной.

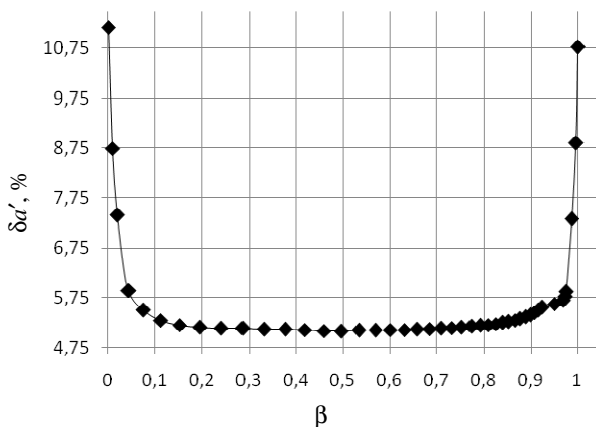


Рис. 2.3. Зависимость относительной погрешности измерения температуропроводности $\delta a'$ от значения β для $Q_n = 55\,000 \text{ Вт}\cdot\text{с}/\text{м}^2$ и $x = 4 \text{ мм}$

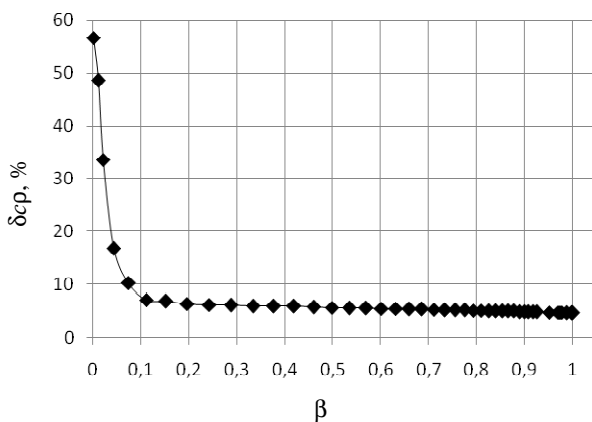


Рис. 2.4. Зависимость относительной погрешности измерения объёмной теплоёмкости δ_{cp} от значения β для $Q_n = 55\,000 \text{ Вт}\cdot\text{с}/\text{м}^2$ и $x = 4 \text{ мм}$

В рамках второй части данного исследования были рассчитаны значения погрешностей измерения коэффициентов теплопроводности при значениях расстояния x из диапазона $2 \text{ мм} < x < 8 \text{ мм}$.

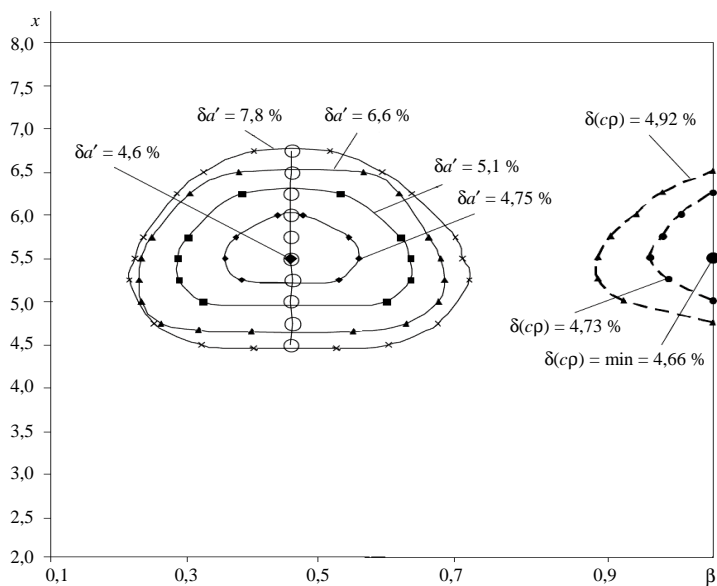


Рис. 2.5. Линии равных уровней погрешностей измерения теплопроводности a и объёмной теплоёмкости cp (при использовании метода плоского «мгновенного» источника тепла) [201]

В результате были построены линии равных уровней погрешностей измерения температуропроводности a и объёмной теплоёмкости c_p в плоскости с координатами β и x , представленные на рис. 2.5.

* * *

Из материалов, изложенных в данном параграфе, следует [201], что минимальное значение относительных среднеквадратических погрешностей δa измерения температуропроводности достигается при $\beta = 0,498 \approx 0,5$, $x = 5,5$ мм, причём, приемлемые значения погрешностей имеют место при $0,35 < \beta < 0,65$ и $5 \text{ мм} < x < 6,5$ мм.

Для минимизации среднеквадратических $\delta(c_p)$ погрешностей измерения объёмной теплоёмкости c_p её нужно измерять [201] в тот момент времени, когда температура достигает максимума, т.е. при $\beta = 1$. Тогда при $Q_n = 55\,000 \text{ Вт}\cdot\text{с}/\text{м}^2$, $x = 5,5$ мм и $\Delta x = 0,1$ мм, $\Delta T_{\text{max}} = 0,01 \text{ К}$, $\Delta Q_n = 550 \text{ Вт}\cdot\text{с}/\text{м}^2$, получаем $\delta(c_p)_{\text{min}} = 4,66\%$ при $\beta = 1$ и $x_{\text{опт}} = 5,5$ мм.

2.2.5. ПОРЯДОК ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДА ПЛОСКОГО «МГНОВЕННОГО» ИСТОЧНИКА ТЕПЛОТЫ

При экспериментальном измерении теплофизических свойств (с применением предлагаемого метода плоского «мгновенного» источника теплоты) измерительные операции осуществляют в следующем порядке:

1) из исследуемого материала изготавливается образец, состоящий из трёх составных частей в виде плоских пластин: а) центральная пластина с геометрическим размером (толщиной) x_0 ; б) вторая (нижняя) и третья (верхняя) пластины, толщина L_2 и L_3 которых не менее чем в 10 раз превышает толщину x_0 центральной пластины.

2) измеряют геометрический размер x_0 центральной пластины.

3) плоский электрический нагреватель размещают между нижней (второй) пластиной толщиной L_2 и центральной пластиной толщиной x_0 , а первичный измерительный преобразователь (термопара) – между центральной и верхней (третьей) пластиной толщиной L_3 ;

4) на подготовительной стадии эксперимента с использованием первичного измерительного преобразователя контролируют температуру исследуемого образца и после достижения постоянного значения этой контролируемой температуры в плоскости контакта между центральной и верхней пластинами образца, принимают решение о возможности перейти к активной стадии эксперимента.

5) в момент $\tau = 0$ начала активной стадии регистрирует начальное значение температуры $T_0 = T(x_0, 0)$, затем на плоский нагреватель подают

напряжение питания, обеспечивая подвод постоянной сложности P , а в момент времени $\tau = \tau_n$ напряжение питания нагревателя отключают.

6) с постоянным шагом $\Delta\tau$ во времени измеряют и регистрируют значение температур $T_i = T(x_0, \tau_i)$, $i = 0, 1, 2, \dots, n$ соответствующие моментам времени $\tau_i = \tau_{i-1} + \Delta\tau$ ($\tau_0 = 0$).

7) на каждом шаге эксперимента сравнивают текущее значение температуры T_i с предыдущим T_{i-1} и определяют максимальное значение температуры $T_{\max} = T(x_0, \tau_{\max})$.

8) после начала снижения фактических значений температуры проверяют критерий окончания активной стадии

$$\beta_i = \frac{T_i - T_0}{T_{\max} - T_0} \leq \alpha,$$

где α – наперед заданное значение этого критерия из диапазона $0,9 \leq \alpha \leq 0,99$; после снижения фактического значения отношения разностей температур $\beta_i \leq \alpha$, активная стадия эксперимента завершается.

9) в процессе обработки зарегистрированы экспериментальные данные в виде пар значений моментов времени δ_i и соответствующих им температур

$$T_i(\tau_i, T_i), i = 1, 2, \dots, k,$$

где k – номер последнего шага измерений на активной стадии эксперимента, определяют значение τ' момента времени, соответствующее оптимальному значению безразмерного параметра $\beta_{\text{опт}} = 0,498 \approx 0,5$, а искомые теплофизические свойства исследуемого материала вычисляют по формуле (2.6), (2.7а) и $\lambda = \alpha c\rho$.

10) полученные значения искомых теплофизических свойств заносятся в базу данных, а при необходимости печатается протокол измерения.

Более подробно сведения об осуществлении измерительных операций разработанного метода плоского «мгновенного» источника теплоты, об устройстве измерительного устройства и об алгоритме функционирования программного обеспечения изготовленной информационно-измерительной и управляющей системы приведены ниже в параграфе 3.1 третьей главы.

2.3. АНАЛИЗ ИСТОЧНИКОВ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЁРДЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ПЛОСКОГО «МГНОВЕННОГО» ИСТОЧНИКА ТЕПЛОТЫ

Результаты измерения температуропроводности, теплопроводности и объёмной теплоёмкости теплоизоляционных и теплозащитных материалов, полученные с применением метода плоского «мгновенного» источ-

ника теплоты, всегда содержат погрешности, составляющие которых обусловлены различными причинами и явлениями.

Для того чтобы правильно сконструировать и изготовить измерительное устройство, а затем успешно осуществить экспериментальное измерение теплофизических свойств в соответствии с проектируемым (разрабатываемым) методом, необходимо знать и понимать все причины и источники погрешностей измерения теплопроводности.

Ниже рассмотрены основные источники, причины и явления, вносящие вклад в результирующую погрешность измерения температуропроводности, теплопроводности и объёмной теплоёмкости твёрдых теплоизоляционных и теплозащитных материалов. Приведённые ниже результаты анализа изложены в соответствии с рекомендациями мнемонического приёма «4М...6М», используемого в теории управления качеством при классификации (стратификации, группировке, расслаиваний) причин несоответствий [202, 203, 210].

2.3.1. АНАЛИЗ ИСТОЧНИКОВ ПОГРЕШНОСТЕЙ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ НЕПОЛНЫМ ВЫПОЛНЕНИЕМ ДОПУЩЕНИЙ, ПРИНЯТЫХ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИСПОЛЬЗУЕМОГО МЕТОДА И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЯЧЕЙКИ

Математическая модель метода плоского «мгновенного» источника теплоты включает в себя [28 – 30] дифференциальное уравнение Фурье

$$c\rho \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right] + Q_{\text{п}} \delta(\tau) \delta(x), \quad \tau > 0, \quad -\infty < x < +\infty; \quad (2.12)$$

в правой части которого записан источник теплоты, действовавший в момент времени $\tau = 0$ в плоскости с координатой $x = 0$, с начальным условием

$$T(x, 0) = T_0 = 0 \quad (2.13)$$

и с граничными условиями

$$T(-\infty, \tau) = T(+\infty, \tau) = T_0 = 0, \quad (2.14)$$

где $T(x, \tau)$ – температура в точке с координатой x в момент времени τ ; c, ρ, λ – удельная теплоёмкость, плотность и теплопроводность исследуемого вещества; T_0 – начальная температура вещества, принимаемая за начало температурной шкалы данного эксперимента ($T_0 = 0$); $Q_{\text{п}}$ – количество тепла, выделившееся в единице поверхности плоского

нагревателя, Дж/м²; $\delta(\tau)$, $\delta(x)$ – символические дельта-функции Дирака [28 – 30, 58].

В параграфе 2.2 и в статье [201] математическими методами получены расчётные формулы для вычисления искомым теплофизических свойств по результатам проведения эксперимента, обеспечивающие минимизацию погрешностей измерений, имеющие вид:

$$a = \frac{x_0^2}{4z'\tau'}; \quad (2.15)$$

$$c\rho = \frac{Q_{\text{п}}}{[T_{\text{max}} - T_0]x_0\sqrt{2\pi e}}, \quad (2.16)$$

где a , $c\rho$ – температуропроводность и объёмная теплоёмкость материалов; x_0 – координата поверхности, в которой производится измерение температуры $T(x_0, \tau)$; τ' – момент времени, в который достигается заданное значение параметра

$$\beta = (T(x_0, \tau') - T_0) / (T_{\text{max}} - T_0); \quad (2.17)$$

T_{max} – максимальное значение температуры $T(x_0, \tau)$, достигаемое в процессе эксперимента; z' – большее по величине значение корня уравнения

$$\sqrt{z} \exp(-z) = \beta / \sqrt{2e}. \quad (2.18)$$

Отметим, что после определения значений a и $c\rho$, теплопроводность вычисляется по формуле

$$\lambda = a c\rho. \quad (2.19)$$

Рассмотрим подробнее причины (источники) возникновения погрешностей измерения теплофизических свойств теплоизоляционных и теплозащитных материалов методом плоского «мгновенного» источника теплоты, теоретические основы которого приведены выше в параграфе 2.2 и в статье [201].

**Снижение влияния источников погрешностей,
обусловленных неполным выполнением допущений,
принятых при записи правой части дифференцированного
уравнения теплопроводности Фурье в виде функции $Q_{\text{п}}\delta(x)\delta(\tau)$**

Влияние этих источников погрешностей рассмотрено в статье [211].

Запись правой части уравнения теплопроводности в краевой задаче (2.12) – (2.14) в виде функции $Q_{\text{п}}\delta(x)\delta(\tau)$ основана на допущениях, что в начальный момент $\tau = 0$ активной стадии эксперимента в единице площади плоскости $x = 0$ внутри исследуемого материала должно выделиться конечное количество теплоты $Q_{\text{п}}$, Дж/м².

При практическом осуществлении разработанного метода:

- 1) источник теплоты выполняют в виде тонкого электрического нагревателя, имеющего малую, но конечную (не нулевую) толщину Δ ;
- 2) выделение заданного количества теплоты $Q_{\text{п}}$ в единице площади этого нагревателя в реальности происходит в течение конечного промежутка времени $0 < \tau < \tau_{\text{п}}$, где $\tau_{\text{п}}$ – длительность импульса.

Для преодоления негативных последствий неполного выполнения рассматриваемых допущений необходимо предусматривать следующее [211]:

– толщина Δ используемого нагревателя должна быть намного меньше расстояния x_0 от нагревателя, размещённого при $x = 0$, до плоскости с координатой $x = x_0$, в которой установлен первичный измерительный преобразователь (ПИП) температуры, т.е. необходимо выполнить условие $\Delta = (0,02 \dots 0,05) x_0$;

– длительность $\tau_{\text{п}}$ теплового импульса должна быть много меньше значения момента времени τ_{max} , в который достигается максимальное значение температуры $T_{\text{max}} = T(x_0, \tau_{\text{max}})$ в плоскости с координатой $x = x_0$, а именно, должно быть $\tau_{\text{п}} = (0,04 \dots 0,1) \tau_{\text{max}}$.

При практическом осуществлении эксперимента (для уменьшения результирующих погрешностей измерения α , λ , c_p) следует использовать рекомендации по введению поправок на конечную длительность $\tau_{\text{п}}$ теплового импульса, изложенные в [10, 28, 30]. Введение таких поправок в виде

функций $\Phi_{\alpha}\left(\frac{\tau_{\text{п}}}{\tau_{\text{max}}}\right)$, $\Phi_{c_p}\left(\frac{\tau_{\text{п}}}{\tau_{\text{max}}}\right)$, $\Phi_{\lambda}\left(\frac{\tau_{\text{п}}}{\tau_{\text{max}}}\right)$ впервые было предложено

в работах академика А. Г. Шашкова [10, 28, 30].

Снижение влияния источников погрешностей, обусловленных неполным выполнением допущений

о неограниченности $-\infty < x < +\infty$ образца исследуемого материала и о задании граничных условий $T(-\infty, \tau) = T(+\infty, \tau) = T_0 = 0$ при $x = \pm\infty$

Влияние этих источников погрешностей подробно рассмотрено в [211].

Постановка краевой задачи (2.12) – (2.14) предполагает, что образец имеет достаточно большие размеры $-L < x < x_0 < L$, позволяющие считать, что $L \rightarrow +\infty$ и $-L \rightarrow -\infty$. Для того, чтобы рассматриваемое допущение не приводило к значительным погрешностям измерений (как показали проведённые исследования), при изготовлении (подготовке) исследуемого образца следует обеспечить выполнение требования $x_0 \leq 0,1L$ (или $2L \geq 20x_0$), т.е. общая толщина $2L$ используемого образца должна быть не менее чем в двадцать раз больше расстояния x_0 от плоскости размещения нагревателя до плоскости установки первичного измерительного преобразователя (ПИП) температуры.

Заданные в краевой задаче (2.12) – (2.14) граничные условия $T(-\infty, \tau) = T(+\infty, \tau) = T_0 = 0$ могут считаться выполненными с достаточной степенью точности как за счёт выполнения требования $x_0 \leq 0,1L$ ($2L \geq 20x_0$), так и за счёт использования легкосъёмной изоляции, защищающей не только внешние поверхности исследуемого образца при $x = -L$ и $x = +L$, но и боковые поверхности этих образцов.

**Снижение влияния источника погрешностей,
обусловленного неполным достижением стационарного
режима работы измерительной установки при подготовке
к проведению активной стадии эксперимента**

Влияние этих источников погрешностей подробно рассмотрено в [211].

Математическая модель (2.12) – (2.14) предполагает, что контролируемая в процессе эксперимента температура $T(x, \tau)$ в момент $\tau = 0$ начала активной стадии эксперимента должна быть постоянной, одинаковой во всех точках исследуемого образца $T(x, 0) = T_0 = 0$, как это определено в начальном условии (2.13). Таким образом, температура $T(x, 0)$ непосредственно перед моментом начала активной стадии эксперимента должна быть строго постоянной (неизменной) во времени, что возможно только при достижении полностью установившегося (стационарного) режима работы измерительной установки в конце подготовительной стадии.

Для уменьшения влияния этого источника погрешностей на протяжении подготовительной стадии необходимо контролировать изменение во времени значений температуры $T_i^n = T^n(x_0, \tau_i)$, $i = 1, 2, \dots, k$, а регистрацию начального (для активной стадии эксперимента) значения температуры $T(x_0, 0)$ следует осуществлять только после того, когда будет достигнута полная уверенность в том, что желаемый стационарный режим работы экспериментальной установки на подготовительной стадии достигнут с допустимой погрешностью. При этом, в качестве $T(x_0, 0)$ принимается последнее значение $T(x_0, 0) = T^n(x_0, \tau_k)$, зарегистрированное в конце подготовительной стадии. О достижении стационарного режима работы можно судить, например, по динамическому критерию E_T вида [28, 30, 211]

$$E_T = \frac{\Delta\tau}{T^n - T_0^n} \frac{dT^n}{d\tau} \approx \frac{T_i^n - T_{i-1}^n}{T_i^n - T_0^n} \leq \varepsilon_T, \quad (2.20)$$

где $\Delta\tau$ – величина шага измерения во времени значений температуры T_i^n ; ε_T – допустимая погрешность достижения стационарного значения температуры T^n ; T_i^n , T_{i-1}^n , T_0^n – значения температуры на i -м и на $(i-1)$ -м и на нулевом шагах измерения на подготовленной стадии.

Для повышения надёжности контроля наступления стационарного режима работы экспериментальной установки динамический критерий E_T может быть представлен в виде [28, 30, 211]

$$E_T = \frac{T_i^n - T_{i-n}^n}{T_i^n - T_0^n} \leq \varepsilon_T, \quad (2.20a)$$

где T_i^n, T_{i-n}^n – значения температур на подготовительной стадии на i -м и на $(i - n)$ -м шагах измерения (отстоящих друг от друга на постоянное число n шагов измерения).

Если величина шага измерения Δt во времени достаточно велика, то число n может быть задано относительно небольшим ($n = 2 \dots 5$), а при малой величине шага Δt иногда приходится задавать большое значение числа n .

**Снижение влияния источников погрешностей измерений
из-за невыполнения допущений об однородном начальном
распределении температуры $T(x, 0) = T_0 = 0$ в образце
в момент начала активной стадии эксперимента**

Условия устранения влияния рассматриваемых источников погрешностей опубликованы в статье [211].

Используемое в краевой задаче (2.12) – (2.14) начальное условие (2.13) может быть с достаточной точностью выполнено [211]:

1) за счёт длительного выдерживания исследуемого образца при постоянной температуре T^n на протяжении подготовительной стадии эксперимента;

2) за счёт контроля значения динамического параметра

$$E_T = \frac{T_i^n - T_{i-m}^n}{T_i^n - T_0^n} \leq \varepsilon_T \text{ до достижения наперед заданной малой величины } \varepsilon_T.$$

Выполнение этих условий обеспечивает приемлемые величины составляющих результирующих относительных погрешностей $\delta a, \delta \lambda, \delta c_p$ измерения искомых теплофизических свойств a, λ, c_p , обусловленные рассматриваемыми в данном пункте источниками (причинами) погрешностей.

**Снижение влияния источников погрешностей, обусловленных
невыполнением допущения об однородном (равномерном) распределении
количества теплоты Q_n по поверхности плоского нагревателя во время
действия плоского «мгновенного» источника теплоты**

Условия устранения влияния рассматриваемых источников погрешностей опубликованы в статье [211].

Для выполнения этого допущения при изготовлении электрического нагревателя следует обеспечить равномерное распределение электрического сопротивления по поверхности этого нагревателя.

Это требование может быть выполнено при изготовлении электрического нагревателя:

1) путём размещения на тонкой плоской подложке проволочных элементов в электрической изоляции, равномерно установленных относительно друг друга на поверхности этой подложки;

2) путём изготовления (вырезания) плоского нагревателя из тонкого металлического (например, пермаллового) листа или фольги постоянной толщины таким образом, чтобы все элементы такого нагревателя имели одинаковое электрическое сопротивление.

В этом случае при пропускании электрического тока через нагреватель в каждом его элементе выделяется одинаковое количество теплоты, что позволяет считать рассматриваемое допущение выполненным [211].

**Снижение влияния источников погрешностей,
обусловленных неполным выполнением допущений
о возможности пренебречь геометрическими размерами и
теплофизическими свойствами электрического нагревателя и
первичного измерительного преобразователя температуры**

Для выполнения этих допущений толщина электрического нагревателя и поперечный геометрический размер используемого первичного измерительного преобразователя (ПИП) температуры должны быть как можно меньше. Проведённые исследования позволяют сформировать следующие рекомендации [211]:

- электрический нагреватель следует изготавливать из пермаллового листа толщиной (0,05...0,1) мм;
- в качестве первичного измерительного преобразователя температуры лучше всего использовать термопару, например типа хромель-копель, изготовленную методом конденсаторной сварки встык из проволочек диаметром порядка 0,1 мм.

* * *

Выполнение изложенных выше рекомендаций позволяет считать, что допущения, положенные в основу используемой математической модели (2.12) – (2.14), выполнены с достаточной для практических потребностей точностью, что подтверждается проведёнными экспериментальными исследованиями изготовленного макета измерительного устройства, реализующего метод плоского «мгновенного» источника теплоты.

2.3.2. АНАЛИЗ ИСТОЧНИКОВ ПОГРЕШНОСТЕЙ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ОШИБКАМИ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ МЕТОДА ПЛОСКОГО «МГНОВЕННОГО» ИСТОЧНИКА ТЕПЛОТЫ

Снижения влияния источников погрешностей определения искомым теплофизических свойств, обусловленных погрешностями измерений значений момента времени τ_{\max} , соответствующего достижению максимальной температуры $T_{\max} = T(x_0, \tau_{\max})$

В статье [201] показано, что определение момента времени τ_{\max} , соответствующего достижению максимальной температуры $T_{\max} = T(x_0, \tau_{\max})$ в ходе эксперимента, всегда связано с большими относительными погрешностями, достигающими величины $\delta\tau_{\max} = 15...20\%$. В связи с этим в статье [201] предложено вместо измерения величины τ_{\max} перейти к определению (и использованию при обработке экспериментальных данных) значения момента времени $\tau'(\beta)$, соответствующего достижению заданной величины безразмерного параметра $\beta = \frac{T(x_0, \tau') - T_0}{T_{\max} - T_0}$, значение которого

легко контролировать в процессе осуществления метода. Причём, в статье [201] показано, что величину безразмерного параметра β следует выбирать из диапазона $0,3 \leq \beta \leq 0,65$, причём оптимальное значение этого параметра $\beta_{\text{опт}} = 0,498$.

Переход к измерению значения $\tau'(\beta)$ при значениях $\beta \approx \beta_{\text{опт}} = 0,498$ позволяет [211] существенно уменьшить результирующие погрешности δa , $\delta \lambda$, δc_p определения теплофизических свойств a , λ , c_p по сравнению со случаем измерения момента времени τ_{\max} .

Снижение влияния источников погрешностей, обусловленных наличием неоднородностей и тепловых сопротивлений в образце исследуемого материала

В основу разработанного нами метода плоского «мгновенного» источника теплоты положены допущения о том, что образец исследуемого материала является однородным, изотропным и в нём отсутствуют локальные тепловые сопротивления. Однако, из-за внедрения в образец плоского электрического нагревателя при $x = 0$ и первичного измерительного преобразователя температуры (термопары) при $x = x_0$ создают определённые неоднородности внутри исследуемого материала. Кроме того, в местах контакта трёх составных элементов образца возникают тепловые сопротивления, также искажающие температурное поле внутри образца.

Для преодоления этих источников погрешности следует рекомендовать [211]:

– при изготовлении составных частей образца надо следить, чтобы в этих подготовленных составных частях не было видимых неоднородно-

стей; при выявлении признаков неоднородностей (особенно в центральном элементе толщиной x_0) необходимо изготовить новые элементы;

- для предотвращения появления тепловых контактных сопротивлений внутри многослойного образца необходимо с высокой точностью изготавливать поверхности трёх элементов образца, контактирующие между собой (а также с нагревателем и термопарой) с учётом недопустимости отклонения формы этих поверхностей от плоскости;

- осуществлять тщательную обработку поверхностей с целью уменьшения микрошероховатостей и макронеровностей путём шлифовки, полировки и притирки поверхностей образцов на специальных приспособлениях [28, 30, 211];

- предотвращать загрязнения контактных поверхностей, способных привести к возрастанию контактных тепловых сопротивлений [28, 30, 211];

- использовать специальные прижимающие устройства с постоянным усилием, способствующие существенному снижению влияния контактных тепловых сопротивлений [29, 30, 211];

- если позволяет исследуемый материал, то следует применять сухие или мокрые смазки, способствующие уменьшению контактных тепловых сопротивлений [28 – 30, 211].

Снижение влияния источников погрешностей, обусловленных изменением температуры внешних поверхностей исследуемого образца в процессе эксперимента

Из-за изменения температуры окружающей среды возможно возникновение дополнительных погрешностей измерения искомых теплофизических свойств. Для преодоления негативных последствий этих источников погрешностей следует рекомендовать следующее [211]:

- для защиты внешних и боковых поверхностей исследуемого образца в конструкцию измерительной ячейки следует ввести легкосъёмную тепловую изоляцию;

- для дополнительной защиты образца от внешних тепловых воздействий можно использовать размещение измерительной ячейки в небольшом воздушном термостате, обеспечивающего поддержание постоянной температуры воздуха вокруг легкосъёмной тепловой изоляции.

Снижение влияния источников погрешностей, вызванных упущениями в работе персонала при осуществлении метода измерения

При практическом осуществлении метода возможно появление дополнительных источников погрешностей, вызванных ошибками оператора, например [211]:

1) ошибками и погрешностями, допущенными при изготовлении составных частей образца и их неправильном размещении в измерительной ячейке при подготовке эксперимента;

2) ошибками при установке нагревателя и первичного измерительного преобразователя температуры (термопары) между составными частями образца;

3) при применении недопустимых сухих или мокрых смазок, используемых для снижения контактных тепловых сопротивлений;

4) при вводе неверных исходных данных в компьютер, управляющий ходом эксперимента и осуществляющий обработку полученных экспериментальных данных;

5) при неправильном подключении используемых средств измерений к интерфейсу компьютера и др.

Для преодоления негативных последствий таких источников погрешностей на начальных этапах использования метода плоского «мгновенного» источника теплоты следует осуществить обучение оператора теоретическим и практическим основам использования этого метода, а затем провести тренировки оператора по осуществлению всех необходимых операций и действий на рабочем месте. В дальнейшем можно рекомендовать осуществление периодического контроля правильности действий оператора при выполнении всех видов работ на измерительной установке [202 – 204, 211].

2.3.3. АНАЛИЗ ИСТОЧНИКОВ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИСКОМЫХ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ НЕТОЧНЫМ ИЗМЕРЕНИЕМ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН, ВХОДЯЩИХ В РАСЧЁТНЫЕ ФОРМУЛЫ

Анализ влияния этих источников погрешностей также рассмотрен в статье [211].

В формулы (2.15) – (2.19), применяемые при вычислении искомых теплофизических свойств a и c_p , входят физические величины:

1) температуры T_0 , T_{\max} , $T(x_0, \tau')$;

2) количество теплоты Q_n , выделившееся в единице поверхности плоского нагревателя;

3) геометрический размер x_0 ;

4) значение момента времени τ' , соответствующее достижению заданного значения параметра $\beta = (T(x_0, \tau') - T_0)/(T_{\max} - T_0)$.

Из полученных в статье [201] формул для вычисления относительных погрешностей δa , δc_p определения искомых теплофизических

свойств a и c_p следует, что эти результирующие погрешности δa , δc_p зависят от абсолютных ΔT_0 , ΔT_{\max} , $\Delta T(x_0, \tau')$, ΔQ_p , Δx_0 , $\Delta \tau'$ и относительных погрешностей δT_0 , δT_{\max} , $\delta T(x_0, \tau')$, δQ_p , δx_0 , $\delta \tau'$ погрешностей непосредственно измеряемых физических величин T_0 , T_{\max} , $T(x_0, \tau')$, Q_p , x_0 , τ' .

Очевидно, что для снижения результирующих погрешностей δa , δc_p определения искомых теплофизических свойств a и c_p , следует принять меры для уменьшения абсолютных и относительных погрешностей непосредственно измеряемых физических величин T_0 , T_{\max} , $T(x_0, \tau')$, Q_p , x_0 , τ' , что может быть достигнуто за счёт [28 – 30]:

1) снижения погрешностей используемых первичных измерительных преобразователей, например, путём замены имеющихся на более точные [211];

2) использования методов статистической обработки результатов многократных измерений непосредственно измеряемых физических величин, что позволяет существенно повысить точность результатов измерений за счёт снижения действия случайных помех и шумов [211];

3) применения аппаратных средств, снижающих влияние внешних наводок и шумов, например, использование электрических экранов, установка фильтров, устраняющих влияние внешних электромагнитных наводок переменного тока во входных цепях используемых приборов и во входных каналах информационно-измерительной системы [211];

4) использования рациональных измерительных схем и выбора оптимального варианта организации процесса измерения, позволяющих дополнительно уменьшить влияние погрешностей непосредственно измеряемых физических величин на конечный результат определения искомых теплофизических свойств [211], например, путём замены измерения величины τ_{\max} (с погрешностью $\delta = 10...20\%$) на определение величины τ' , осуществляемое со значительно меньшей погрешностью $\delta \tau' = 0,5...2\%$.

* * *

Выполнение изложенных в данном параграфе рекомендаций по снижению влияния трёх групп источников погрешностей:

1) обусловленных неполным выполнением допущений, принятых при разработке математической модели (2.12) – (2.14) метода плоского «мгновенного» источника теплоты;

2) связанных с ошибками, допущенными при осуществлении измерительных операций используемого метода плоского «мгновенного» источника теплоты;

3) вызванных неточным определением значений физических величин, непосредственно измеряемых в ходе эксперимента, позволяет (уже на этапе

проектирования и разработки измерительных операций метода плоского «мгновенного» источника теплоты и конструкции измерительной ячейки) принять меры по устранению негативного влияния этих источников погрешностей, в том числе, способствует правильному выбору оптимальных режимных параметров процесса измерения и определению рациональных конструкционных размеров измерительного устройства [211].

2.4. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИКИ ВВЕДЕНИЯ ПОПРАВОК НА СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ

При проектировании и модернизации теплофизических методов, приборов и средств измерений рекомендуется использовать так называемые инструменты и методы менеджмента качества [202 – 204]. В статье [204] рассмотрено применение одного из таких инструментов (а именно, методологии решения проблем [202 – 204]) для улучшения метрологических характеристик разрабатываемых теплофизических методов и измерительных устройств.

Одним из необходимых этапов улучшения метрологических характеристик проектируемых методов и устройств является разработка методики введения поправок на систематические погрешности измерения искомым теплофизическим свойствам (ТФС) [204, 218].

В соответствии с рекомендациями по межгосударственной стандартизации РМГ 29-99 [205] поправка – это значение величины, вводимое в неисправленный результат измерения с целью исключения (или хотя бы уменьшения) составляющей систематической погрешности.

2.4.1. ФОРМЫ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ, ИСПОЛЗУЕМЫХ ПРИ ВВЕДЕНИИ ПОПРАВОК

В настоящее время для введения поправок на систематические погрешности измерений используются следующие варианты математических зависимостей [27, 30, 73, 205, 206, 218]:

- первая форма введения поправок [205, 206]

$$\varphi_{\text{исп}} = \varphi_{\text{изм}} + \Delta(\varphi_{\text{изм}}), \quad (2.21)$$

где $\varphi_{\text{изм}}$, $\varphi_{\text{исп}}$ – неисправленный результат измерения и исправленное (после введения поправки) значение физической величины; $\Delta(\varphi_{\text{изм}})$ – аддитивная поправка (численно равная взятой с обратным знаком величине систематической погрешности при конкретном значении неисправленного измеренного значения $\varphi_{\text{изм}}$);

- вторая форма введения поправок

$$\varphi_{\text{исп}} = \varphi_{\text{изм}} m(\varphi_{\text{изм}}), \quad (2.22)$$

где $m(\varphi_{\text{изм}})$ – поправочная функция, после умножения на которую неисправленное измеренное значение $\varphi_{\text{изм}}$ физической величины преобразуется в исправленное значение $\varphi_{\text{исп}}$;

- третья форма введения поправок [27, 73]

$$\varphi_{\text{исп}} = f(\varphi_{\text{изм}}, \alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots), \quad (2.23)$$

где $f(\varphi_{\text{изм}})$ – функция, зависящая от неисправленного измеренного значения физической величины $\varphi_{\text{изм}}$ и параметров $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots$, часто задаваемая в виде полинома

$$\varphi_{\text{исп}} = \alpha_0 + \alpha_1 \varphi_{\text{изм}} + \alpha_2 (\varphi_{\text{изм}})^2 + \alpha_3 (\varphi_{\text{изм}})^3 + \dots, \quad (2.23a)$$

позволяющего вычислить исправленное значение физической величины $\varphi_{\text{исп}}$ по измеренному значению $\varphi_{\text{изм}}$.

Следует отметить, что все три формулы (2.21) – (2.23) для введения поправок на систематические погрешности легко могут быть преобразованы одна в другую, например, после выноса за скобку величины $\varphi_{\text{изм}}$ в формуле (2.21), получаем

$$\varphi_{\text{исп}} = \varphi_{\text{изм}} \left(1 + \frac{\Delta(\varphi_{\text{изм}})}{\varphi_{\text{изм}}} \right), \quad (2.21a)$$

откуда видно, что стоящее в формуле (2.21a) выражение в скобках совпадает с функцией $m(\varphi_{\text{изм}}) = 1 + \frac{\Delta(\varphi_{\text{изм}})}{\varphi_{\text{изм}}}$, использованной в правой части

формулы (2.22). Причём, формула (2.23) представляет собой наиболее общую запись математических зависимостей для введения поправок. Именно такие зависимости (2.23), (2.23a) наиболее широко применяются [218] при проектировании и разработке теплофизических методов и средств измерения в ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет» и используются в качестве основы при изложении содержания данного параграфа.

2.4.2. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИКИ ВВЕДЕНИЯ ПОПРАВКИ НА СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Из изложенного выше видно, что при разработке методики введения поправок одним из главных результатов является определение значений параметров $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots$ расчётной зависимости (2.23). Рекомендуемый порядок разработки методики [218] введения поправок на систематические погрешности измерения ТФС проиллюстрирован на рис. 2.6.



Рис. 2.6. Процедура разработки методики введения поправок на систематические погрешности измерения теплофизических свойств веществ [218]

В соответствии с рекомендациями методологии решения проблем [202 – 204] после определения проблемы и планирования действий, направленных на улучшение метрологических характеристик, приступают к осуществлению запланированного усовершенствования, а именно [204]:

- решают математическую задачу оптимизации разрабатываемого метода и измерительного устройства;
- выбирают оптимальные режимные параметры метода измерения и рациональные конструкционные размеры измерительного устройства;
- разрабатывают сборочный чертёж и чертежи деталей измерительного устройства;
- изготавливают детали, приобретают необходимые комплектующие изделия, осуществляют сборку и отладку измерительного устройства;
- разрабатывают и отлаживают базовый вариант программного обеспечения проектируемой системы;
- объединяют изготовленное измерительное устройство и разработанное программное обеспечение в единую информационно-измерительную систему (ИИС), выполняют отладку работы этой системы;
- с использованием созданной ИИС осуществляют экспериментальное измерение теплофизических свойств рабочих эталонов (образцов веществ и материалов) с известными свойствами (блок 1 на рис. 2.6);
- путём сравнения полученных результатов измерений с известными значениями ТФС рабочих эталонов оценивают вклад (блок 2) имеющихся систематических погрешностей в суммарные погрешности изменений ТФС эталонных образцов;
- если вклад систематических погрешностей более 20...30% от значений суммарных погрешностей измерений, принимают решение [218] о целесообразности разработки методики введения поправок на систематические погрешности измерений (блок 3 на рис. 2.6);
- приступают к планированию дальнейших действий (блок 4), а затем к выполнению последующей работы, основные этапы которой проиллюстрированы в виде блоков 5 – 11 на рис. 2.6.

Рассмотрим подробнее содержание и результаты работ, проиллюстрированные в виде блоков 5 – 11 поточной диаграммы, представленной на рис. 2.6.

При планировании работ по разработке методики введения поправок на систематические погрешности измерений (блок 4) должно быть достигнуто следующее [218]:

- 1) сформулирован ясный план дальнейших действий;
- 2) идентифицированы потенциальные барьеры (препятствия) и предусмотрены необходимые предупреждающие действия [202 – 204];

3) предусмотрено выделение и приобретение всех необходимых ресурсов для осуществления плана дальнейших действий, в том числе определены:

- наименования и количества требующихся рабочих эталонов (образцов веществ и материалов с известными значениями ТФС);
- потребности в обучении и тренинге на рабочих местах персонала, вовлечённого в выполнение запланированной работы и др.

После приобретения требующихся рабочих эталонов и обучения персонала (блок 5), в соответствии с рекомендацией блока 6 приступают к многократным измерениям ТФС с применением разработанного метода и измерительного устройства. На этом этапе работы желательно обеспечить осуществление от 5 до 10 повторных измерений ТФС с каждым используемым рабочим эталоном при полной перезакладке этих эталонов (образцов веществ) в измерительном устройстве ИИС.

После завершения намеченной программы экспериментальных измерений ТФС рабочих эталонов осуществляют работу (блок 7) с целью выявления возможных промахов [27, 30, 73, 205, 206, 218]. После отбрасывания выявленных промахов возможно появление необходимости в проведении дополнительных экспериментов. После формирования необходимого массива экспериментальных данных осуществляют (блок 7) построение графиков полученных зависимостей (2.23) и визуально оценивают характер этих зависимостей.

На следующем этапе (блок 8) с применением метода наименьших квадратов осуществляют вычисление параметров $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots$ аппроксимирующих полиномов первой, второй или третьей степени [218]:

- при использовании двух рабочих эталонов

$$\varphi_{\text{исп}} = \alpha_0 + \alpha_1 \varphi_{\text{изм}}; \quad (2.21б)$$

- при использовании трёх рабочих эталонов

$$\varphi_{\text{исп}} = \alpha_0 + \alpha_1 \varphi_{\text{изм}} + \alpha_2 (\varphi_{\text{изм}})^2; \quad (2.22а)$$

- при использовании четырёх рабочих эталонов

$$\varphi_{\text{исп}} = \alpha_0 + \alpha_1 \varphi_{\text{изм}} + \alpha_2 (\varphi_{\text{изм}})^2 + \alpha_3 (\varphi_{\text{изм}})^3. \quad (2.23а)$$

Опыт практической работы по выполнению расчётов для оценивания значений суммарных погрешностей (блок 9) показал, что использование полиномов четвёртой, пятой и более высоких степеней в большинстве случаев нецелесообразно по следующим причинам [218]:

- при проведении экспериментов редко удается использовать более трёх или четырёх рабочих эталонов;
- при использовании полиномов третьей и более высоких степеней получаемых в результате аппроксимации зависимости вида (2.23), (2.23а)

имеют колебательный характер и вместо того, чтобы уменьшить суммарные погрешности измерений после введения поправок на систематические погрешности, в большинстве случаев приводят к обратным результатам (повышают суммарные погрешности в промежуточных точках диапазона измерения).

После выполнения расчётов для оценивания значений суммарных погрешностей измерений в соответствии с рекомендациями блока 10 принимают решение о том, какая из зависимостей (2.21б), (2.22а), (2.23а) позволяет наиболее существенно уменьшить суммарные погрешности измерений и должна быть использована при практическом осуществлении разрабатываемой методики введения поправок на систематические погрешности измерения ТФС.

Определённая на предыдущем этапе лучшая из зависимостей (2.21б), (2.22а) или (2.23а), обеспечивающая минимизацию суммарных погрешностей измерений ТФС, в дальнейшем используется в качестве основы математического и алгоритмического обеспечения методики введения поправок на систематические погрешности. Эта математическая зависимость и основанный на ней алгоритм вычислений включаются (блок 11) в состав программного обеспечения ИИС, применяемого как для управления ходом эксперимента, так и при обработке экспериментальных данных.

2.4.3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ИЗЛОЖЕННЫХ ВЫШЕ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИКИ ВВЕДЕНИЯ ПОПРАВОК В РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ ЖИДКОСТЕЙ

При практической проверке изложенной выше методики введения поправок, на примере опубликованных в [27] результатов измерения ТФС жидкостей, было принято решение о возможности применения в качестве рабочих эталонов (образцов с известными значениями теплопроводности) следующих трёх жидкостей: воды, глицерина и 95% раствора спирта этилового. После приобретения этих жидкостей были осуществлены [27] пятикратные повторные измерения теплопроводности, представленные в столбцах 2, 6, 10 табл. 2.1 и 2.2, и пятикратные измерения температуропроводности, представленные в столбцах 2, 6, 10 табл. 2.3 и 2.4. Используемые в работе точные значения теплопроводности воды $\lambda_{\text{в}}^T = 0,59$ Вт/(м·К), глицерина $\lambda_{\text{г}}^T = 0,28$ Вт/(м·К) и 95% спирта этилового $\lambda_{\text{с}}^T = 0,18$ Вт/(м·К) и точные значения температуропроводности воды дистиллированной $a_{\text{в}}^T = 0,91 \cdot 10^{-7}$ м²/с и 95% раствора спирта этилового $a_{\text{сп}}^T = 0,88 \cdot 10^{-7}$ м²/с были определены по справочным данным [207].

2.1. Результаты расчётов при определении параметров α_0 , α_1 полинома первой степени (2.216) для введения поправок на систематические погрешности измерения теплопроводности

№ п/п	Вода дистиллированная, $\lambda_{\text{в}}^T = 0,59$ Вт/(м·К)				Глицерин, $\lambda_{\text{г}}^T = 0,28$ Вт/(м·К)				Спирт, $\lambda_{\text{сп}}^T = 0,18$ Вт/(м·К)			
	$\lambda_{\text{в,изм}},$ Вт/(м·К)	$\delta\lambda_{\text{в,изм}},$ %	$\lambda_{\text{в,исп}},$ Вт/(м·К)	$\lambda_{\text{в,исп}},$ %	$\lambda_{\text{г,изм}},$ Вт/(м·К)	$\delta\lambda_{\text{г,изм}},$ %	$\lambda_{\text{г,исп}},$ Вт/(м·К)	$\delta\lambda_{\text{г,исп}},$ %	$\lambda_{\text{сп,изм}},$ Вт/(м·К)	$\delta\lambda_{\text{сп,изм}},$ %	$\lambda_{\text{сп,исп}},$ Вт/(м·К)	$\delta\lambda_{\text{сп,исп}},$ %
1	0,621	5,25	0,589	-0,19	0,315	12,50	0,283	1,06	0,205	13,89	0,173	-3,89
2	0,622	5,42	0,589	-0,02	0,311	11,07	0,279	-0,37	0,216	20,00	0,184	2,21
3	0,625	5,93	0,593	0,48	0,315	12,50	0,283	1,06	0,210	16,67	0,178	-1,12
4	0,623	5,59	0,591	0,15	0,314	12,14	0,282	0,69	0,214	18,89	0,182	-1,10
5	0,618	4,75	0,586	-0,70	0,311	11,07	0,279	-0,37	0,211	17,22	0,179	-0,56
$a_{\text{ср}},$ $\delta\lambda_{\text{ср}}$	0,622	5,42	0,5896	-0,068	0,313	11,79	0,2812	0,4285	0,211	17,22	0,1792	-0,444

Примечание: $\lambda_{\text{исп}} = -0,03 + 1,0\lambda_{\text{изм}}$; $\Pi_{\text{исп1}} = 1,327$.

**2.2. Результаты расчётов с целью определения параметров полинома второй степени (2.22а)
для введения поправок на систематические погрешности измерения теплопроводности**

№ п/п	Вода дистиллированная, $\lambda_{\text{в}}^T = 0,59 \text{ Вт/(м·К)}$				Глицерин, $\lambda_{\text{г}}^T = 0,28 \text{ Вт/(м·К)}$				Спирт, $\lambda_{\text{сп}}^T = 0,18 \text{ Вт/(м·К)}$			
	$\lambda_{\text{в,изм}}, \text{ Вт/(м·К)}$	$\delta\lambda_{\text{в,изм}}, \%$	$\lambda_{\text{в,исп}}, \text{ Вт/(м·К)}$	$\delta\lambda_{\text{в,исп}}, \%$	$\lambda_{\text{г,изм}}, \text{ Вт/(м·К)}$	$\delta\lambda_{\text{г,изм}}, \%$	$\lambda_{\text{г,исп}}, \text{ Вт/(м·К)}$	$\delta\lambda_{\text{г,исп}}, \%$	$\lambda_{\text{сп,изм}}, \text{ Вт/(м·К)}$	$\delta\lambda_{\text{сп,изм}}, \%$	$\lambda_{\text{сп,исп}}, \text{ Вт/(м·К)}$	$\delta\lambda_{\text{сп,исп}}, \%$
1	0,621	5,25	0,589	-0,14	0,315	12,50	0,282	0,59	0,205	13,89	0,174	-3,26
2	0,622	5,42	0,590	0,03	0,311	11,07	0,278	-0,82	0,216	20,00	0,185	2,67
3	0,625	5,93	0,593	0,55	0,315	12,50	0,282	0,59	0,210	16,67	0,179	-0,56
4	0,623	5,59	0,591	0,20	0,314	12,14	0,281	0,23	0,214	18,89	0,183	1,59
5	0,618	4,75	0,586	-0,66	0,311	11,07	0,278	-0,82	0,211	17,22	0,179	-0,02
$a_{\text{сп}},$ $\delta\lambda_{\text{сп}}$	0,622	5,42	0,5898	-0,034	0,313	11,79	0,2802	0,714	0,211	17,22	0,18	0

Примечание: $\lambda_{\text{исп}} = -0,02 + 0,94\lambda_{\text{изм}} - 0,07\lambda_{\text{изм}}^2$; $\Pi_{\text{исп}2} = 1,295$.

2.3. Результаты расчетов при определении параметров α_0 , α_1 полинома первой степени (2.21б) для введения поправок на систематические погрешности измерения температуропроводности

№ П/П	Вода дистиллированная, $a_{\text{в}}^T \cdot 10^7 = 1,48 \text{ м}^2/\text{с}$				Глицерин, $a_{\text{г}}^T \cdot 10^7 = 0,91 \text{ м}^2/\text{с}$				Спирт, $a_{\text{сп}}^T \cdot 10^7 = 0,88 \text{ м}^2/\text{с}$			
	$a_{\text{в.изм}} \cdot 10^7, \text{ м}^2/\text{с}$	$\delta a_{\text{в.изм}}, \%$	$a_{\text{в.исп}} \cdot 10^7, \text{ м}^2/\text{с}$	$\delta a_{\text{в.исп}}, \%$	$a_{\text{г.изм}} \cdot 10^7, \text{ м}^2/\text{с}$	$\delta a_{\text{г.изм}}, \%$	$a_{\text{г.исп}} \cdot 10^7, \text{ м}^2/\text{с}$	$\delta a_{\text{г.исп}}, \%$	$a_{\text{сп.изм}} \cdot 10^7, \text{ м}^2/\text{с}$	$\delta a_{\text{сп.изм}}, \%$	$a_{\text{сп.исп}} \cdot 10^7, \text{ м}^2/\text{с}$	$\delta a_{\text{сп.исп}}, \%$
1	1,54	4,05	1,43	-3,60	1,05	15,38	0,92	2,17	0,95	7,95	0,83	-5,86
2	1,66	12,16	1,55	4,62	1,06	16,48	0,94	3,29	0,96	9,09	0,84	-4,71
3	1,56	5,41	1,45	-2,23	1,07	17,58	0,95	4,4	1,01	14,77	0,89	1,05
4	1,58	6,76	1,47	-0,86	1,01	10,99	0,89	-2,28	1,01	14,77	0,89	1,05
5	1,59	7,43	1,48	-0,18	1,05	15,38	0,92	2,17	1,02	15,90	0,90	2,2
$a_{\text{ср}},$ $\delta a_{\text{ср}}$	1,586	7,16	1,476	-0,27	1,048	15,16	0,924	1,538	0,99	12,5	0,87	-1,136

Примечание: $a_{\text{исп}} = -0,13 + 1,01a_{\text{изм}}$; $\Pi_{\text{исп3}} = 3,256$.

2.4. Результаты расчетов с целью определения параметров полинома второй степени (2.22а) для введения поправок на систематические погрешности измерения температуропроводности

№ п/п	Вода дистиллированная, $a_B^T \cdot 10^7 = 1,48 \text{ м}^2/\text{с}$				Глицерин, $a_G^T \cdot 10^7 = 0,91 \text{ м}^2/\text{с}$				Спирт, $a_{СП}^T \cdot 10^7 = 0,88 \text{ м}^2/\text{с}$			
	$a_{в.изм} \cdot 10^7, \text{ м}^2/\text{с}$	$\delta a_{в.изм}, \%$	$a_{в.исп} \cdot 10^7, \text{ м}^2/\text{с}$	$\delta a_{в.исп}, \%$	$a_{г.изм} \cdot 10^7, \text{ м}^2/\text{с}$	$\delta a_{г.изм}, \%$	$a_{г.исп} \cdot 10^7, \text{ м}^2/\text{с}$	$\delta a_{г.исп}, \%$	$a_{сп.изм} \cdot 10^7, \text{ м}^2/\text{с}$	$\delta a_{сп.изм}, \%$	$a_{сп.исп} \cdot 10^7, \text{ м}^2/\text{с}$	$\delta a_{сп.исп}, \%$
1	1,54	4,05	1,42	-3,84	1,05	15,38	0,92	1,88	0,95	7,95	0,83	-5,19
2	1,66	12,16	1,56	5,07	1,06	16,48	0,94	2,92	0,96	9,09	0,84	-4,15
3	1,56	5,41	1,44	-2,37	1,07	17,58	0,95	3,96	1,01	14,77	0,89	1,09
4	1,58	6,76	1,47	-0,90	1,01	10,99	0,89	-2,34	1,01	14,77	0,89	1,09
5	1,59	7,43	1,48	-0,16	1,05	15,38	0,92	1,88	1,02	15,91	0,90	2,16
$a_{ср},$ $\delta a_{ср}$	1,586	7,16	1,474	-0,41	1,048	15,16	0,924	1,54	0,99	12,5	0,87	-1,14

Примечание: $a_{исп} = 0,1 + 0,64a_{изм} + 0,14a_{изм}^2$; $\Pi_{исп4} = 3,104$.

Выполненная по рекомендациям [206] проверка показала, что приведённые в столбцах табл. 2.1 – 2.4 экспериментальные данные не содержат грубых ошибок (промахов).

Принимая во внимание, что экспериментальные данные были получены с использованием трёх рабочих эталонов, при выполнении дальнейшей работы вычисляли значения параметров α_0 , α_1 зависимости (2.21б) и параметров α_0 , α_1 , α_2 зависимости (2.22а). Результаты выполненных вычислений для случая использования зависимости (2.21б) представлены в табл. 2.1 и 2.3, а для случая использования зависимости (2.22а) – в табл. 2.2 и 2.4. В этих таблицах использованы обозначения:

$$\delta\lambda_{\text{изм}} = \frac{\lambda_{\text{изм}} - \lambda^T}{\lambda^T} 100\%, \quad \delta a_{\text{изм}} = \frac{a_{\text{изм}} - a^T}{a^T} 100\% \quad \text{– погрешности неис-$$

правленных результатов измерения соответственно теплопроводности и температуропроводности (до введения поправок);

$$\delta\lambda_{\text{исп}} = \frac{\lambda_{\text{исп}} - \lambda^T}{\lambda^T} 100\%, \quad \delta a_{\text{исп}} = \frac{a_{\text{исп}} - a^T}{a^T} 100\% \quad \text{– погрешности ис-}$$

правленных результатов измерений теплопроводности и температуропроводности (после введения поправок на систематическую погрешность).

Полученные в результате выполнения расчётов значения параметров α_0 , α_1 полиномов (2.21б) и параметров α_0 , α_1 , α_2 полиномов (2.22а) приведены в нижних строках табл. 2.1 – 2.4 в виде зависимостей для введения поправок

$$\lambda_{\text{исп}} = -0,03 + 1,0\lambda_{\text{изм}}; \quad (2.21.\lambda)$$

$$\lambda_{\text{исп}} = -0,02 + 0,94\lambda_{\text{изм}} - 0,07(\lambda_{\text{изм}})^2; \quad (2.22.\lambda)$$

$$a_{\text{исп}} = -0,13 + 1,01a_{\text{изм}}; \quad (2.21.a)$$

$$a_{\text{исп}} = 0,1 + 0,64a_{\text{изм}} + 0,14(a_{\text{изм}})^2. \quad (2.22.a)$$

В качестве величины $\Pi_{\text{исп}}$, характеризующей погрешность исправленных результатов измерений, в табл. 2.1 и 2.2 (для измерения теплопроводности) использовали среднеквадратичные оценки

$$\Pi_{\text{исп}} = \sqrt{\frac{1}{3n-1} \left[\sum_{i=1}^n (\delta\lambda_{\text{в.исп}i})^2 + \sum_{i=1}^n (\delta\lambda_{\text{г.исп}i})^2 + \sum_{i=1}^n (\delta\lambda_{\text{сп.исп}i})^2 \right]},$$

а в таблицах 2.3 и 2.4 (для измерения температуропроводности) применяли среднеквадратичные оценки

$$\Pi_{\text{исп}} = \sqrt{\frac{1}{3n-1} \left[\sum_{i=1}^n (\delta a_{\text{в.исп}i})^2 + \sum_{i=1}^n (\delta a_{\text{г.исп}i})^2 + \sum_{i=1}^n (\delta a_{\text{сп.исп}i})^2 \right]}.$$

Из приведённого в табл. 2.1 значения $P_{\text{исп1}} = 1,327\%$ и приведённого в табл. 2.2 значения $P_{\text{исп2}} = 1,295\%$ видно, что использование полинома второй степени (2.22.λ) позволяет получать (после введения поправок) меньшие по величине значения суммарных погрешностей измерений теплопроводности по сравнению с полиномом (2.21.λ).

Из приведённых в табл. 2.3 и 2.4 значений $P_{\text{исп3}} = 3,256\%$ и $P_{\text{исп4}} = 3,104\%$ следует, что при измерении коэффициента температуропроводности использование полинома второй степени (2.22.a) также обеспечивает получение лучших результатов, по сравнению с применением полинома первой степени (2.21.a) и позволяет (после введения поправок) получить меньшие по величине суммарные погрешности измерения температуропроводности.

* * *

Приведённые выше результаты практического применения изложенных в данном параграфе рекомендаций по разработке методики введения поправок на систематические погрешности измерений [218] убедительно свидетельствуют о возможности значительного снижения суммарных погрешностей измерений теплопроводности и температуропроводности жидкостей с использованием методов и устройств, рассмотренных в книге [27].

3. РАЗРАБОТКА, ИЗГОТОВЛЕНИЕ, ОТЛАДКА И ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В данной главе рассмотрены следующие результаты выполненной работы:

- сведения о составе и работе экспериментальной установки на основе изготовленного измерительного устройства, подключённого к информационно-измерительной и управляющей системе, предназначенной для осуществления метода плоского «мгновенного» источника теплоты;
- порядок практического оценивания погрешностей измерения искомых теплофизических свойств по результатам измерительных экспериментов, выполненных с применением образцов материалов с известными значениями теплопроводности и, в некоторых случаях, объёмной теплоёмкости и коэффициента температуропроводности;
- порядок введения поправок в результаты измерения теплопроводности с использованием разработанного метода плоского «мгновенного» источника теплоты и изготовленной экспериментальной установки;
- результаты измерения теплофизических свойств нового конструкционного материала «древосталь», а также древесины берёзы и сосны.

3.1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ПЛОСКОГО «МГНОВЕННОГО» ИСТОЧНИКА ТЕПЛОТЫ

3.1.1. СОСТАВ РАЗРАБОТАННОЙ И ИЗГОТОВЛЕННОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

На основе предложенного в статье [201] метода плоского «мгновенного» источника теплоты была разработана и изготовлена экспериментальная установка, представляющая собой информационно-измерительную и управляющую систему (ИИУС), блок-схема которой приведена на рис. 3.1.

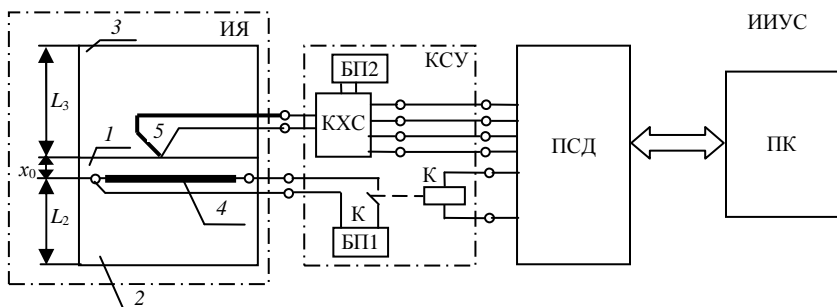


Рис. 3.1. Основные составные части информационно-измерительной и управляющей системы [208]

Экспериментальная установка включает в себя следующие составные части [208]:

- ИЯ – измерительная ячейка, внутри которой монтируют три составных элемента образца, изготовленных из исследуемого материала при подготовке к проведению эксперимента, а именно:

- первый (тонкий) элемент 1 в виде пластины, имеющей толщину x_0 ; отметим, что к точности изготовления элемента 1 предъявляются наиболее высокие требования – верхняя и нижние поверхности этой пластины должны быть параллельны и отстоять друг от друга на расстоянии x_0 мм с отклонением не более $0,05 \dots 0,1$ мм;

- второй и третий элементы 2, 3 также должны быть изготовлены из исследуемого материала, причём, наиболее высокие требования предъявляются к обработке верхней поверхности элемента 2 и нижней поверхности элемента 3; эти поверхности должны быть выполнены в виде плоскостей с отклонением не более, чем $0,05 \dots 0,1$ мм;

- нагреватель 4, изготовленный из тонкой пермаллоевой фольги, размещённой между нижней плоскостью элемента 1 и верхней плоскостью элемента 2; на подготовленной стадии эксперимента нагреватель 4 обесточен, а в момент начала активной стадии эксперимента на нагреватель 4 с блока питания БП через контакт реле К (катушка которого подключена к дискретному выходу платы сбора данных) подаётся импульс постоянной мощности, действующий в промежутке времени $0 \leq \tau \leq \tau_n$, где τ_n – длительность импульса;

- хромель-копелевая термопара 5, которая обеспечивает измерение температуры $T(x_0, \tau)$ в плоскости (между верхней поверхностью элемента 1 и нижней поверхностью элемента 3) на расстоянии x_0 от плоскости, в которой установлен электрический нагреватель 4; следует отметить, что измерение температуры термопарой 5 осуществляется как на подготовительной стадии (для контроля степени достижения установившегося

(стационарного) режима работы), так и на протяжении всей активной стадии эксперимента (для регистрации температурного отклика $T(x_0, \tau)$ образца исследуемого материала на тепловой импульс Q_n , подведённый к образцу в плоскости $x = 0$);

- ПСД – плата сбора данных, управляемая программой, созданной в лицензионной среде LabVIEW, предназначенная для использования при проектировании, разработке и испытании виртуальных приборов; в нашем случае эта плата и программная среда используются для измерения и регистрации в персональном компьютере ПК первичной информации, поступающей с термопары 5, установленной в измерительной ячейке ИЯ, а также для включения и отключения питания нагревателя 4;

- КСУ – комплект согласующих устройств (включающий в себя коробку холодных спаев КХС с встроенным интегральным датчиком температуры, промежуточное реле К и блоки питания БП1, БП2), обеспечивающих взаимное согласование входных и выходных сигналов ИЯ и ПСД;

- ПК – персональный компьютер, используемый в составе информационно-измерительной и управляющей системы (ИИУС):

- 1) для измерения и регистрации первичной информации;

- 2) для управления ходом эксперимента (определение степени завершенности подготовительной стадии и информирование оператора об этом, а при необходимости, и осуществление автоматического перехода к выполнению активной стадии эксперимента);

- 3) для обработки первичной экспериментальной информации (полученной на активной стадии) и вычисления искомых значений искомых теплофизических свойств исследуемого материала;

- 4) для последующего хранения как первичной измерительной информации, так и результатов её обработки в базе данных.

Отметим, что для обеспечения потребностей ИИУС персональный компьютер ПК должен быть укомплектован следующим минимальным составом технических средств: процессор, монитор, клавиатура, принтер и системный адаптер для подключения к локальной сети.

3.1.2. УСТРОЙСТВО ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЯЧЕЙКИ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИССЛЕДУЕМОГО МАТЕРИАЛА

Для экспериментального измерения коэффициента температуропроводности a , объёмной теплоёмкости c_p с последующим вычислением теплопроводности $\lambda = a c_p$ была использована измерительная ячейка, обозначенная ИЯ на рис. 3.1, устройство которой проиллюстрировано на рис. 3.2. На рисунке 3.2 использованы обозначения 1, 2, 3, 4, 5, совпадающие с обозначениями на рис. 3.1.

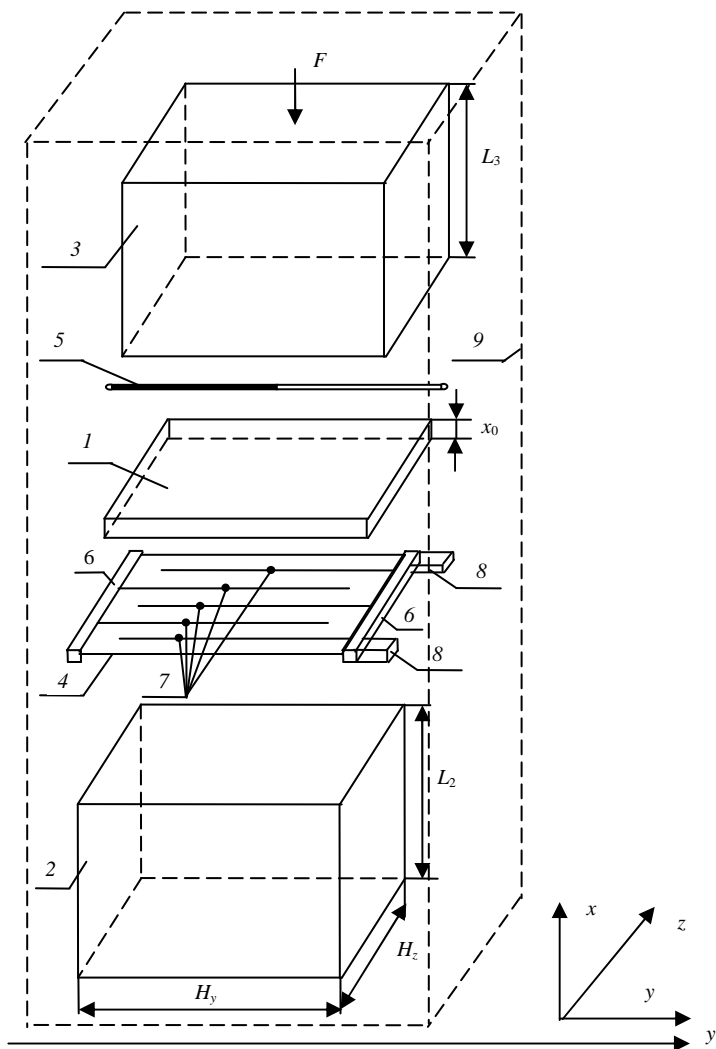


Рис. 3.2. Схема, иллюстрирующая устройство измерительной ячейки и взаимное расположение её составных частей [208]

Представленная на рис. 3.2 измерительная ячейка включает в себя следующие основные элементы [208].

1. Образец исследуемого материала, выполненный в виде трёх элементов 1, 2, 3, требования к изготовлению которых сформулированы выше в п. 3.1.1. Отметим, что толщина x_0 элемента 1 вдоль оси x выбирается в пределах 6...20 мм в зависимости от значений теплофизических свойств

исследуемого теплоизоляционного материала. Высоты L_2 и L_3 вдоль оси x элементов 2 и 3 исследуемого теплоизоляционного материала должны быть порядка 60 мм.

II. Электрический нагреватель 4, размещаемый между элементами 1 и 2 образца. Размеры $H_y = 90$ мм и $H_z = 90$ мм всех трёх элементов 1, 2, 3 (исследуемого образца) вдоль осей y и z были выбраны исходя из размеров электронагревателя 4, изготовленного из листа пермаллоя, закрепленного в электроизоляционных (диэлектрических) держателях 6. Для получения желаемой величины электрического сопротивления $R_{\text{нагр}} = 1,57$ Ом нагревателя 4 в листе пермаллоя были выполнены прорезы 7, а крайние элементы получившегося прорезного нагревателя снабжены электрическими контактами 8, к которым подключают провода, предназначенные для подачи электрического напряжения питания.

III. Первичный измерительный преобразователь температуры, выполненный в виде термопары 5, сваренной встык (из хромелевых и копельевых проводов) и размещаемой между элементами 1 и 3 исследуемого образца.

IV. Легкосъёмная теплоизоляция, условно показанная на рис. 3.2 в виде пунктирных линий 9. Эта легкосъёмная изоляция выполнена из пенопласта в виде трёх составных частей, внутренние размеры которых на 2...3 мм превышают внешние габаритные размеры (вдоль осей y , z) элементов 1, 2 и 3 образца исследуемого материала.

V. Для снижения тепловых сопротивлений, возникающих в местах контакта:

- 1) элементов 1 и 2 образца с нагревателем 4,
- 2) элементов 1 и 3 образца между собой и с термопарой 5,

конструкция измерительной ячейки предусматривает использование груза постоянной массы, создающего силу F , показанную на рис. 3.2 стрелкой, и обеспечивающую взаимное прижатие элементов 1, 2, 3 друг к другу, к нагревателю 4 и термопаре 5 с постоянным усилием, что позволяет стабилизировать величину тепловых сопротивлений и снизить до минимума влияние их изменений на результаты измерения искомых теплофизических свойств, а именно, температуропроводности a , объёмной теплоёмкости c_p и теплопроводности $\lambda = ac_p$.

3.1.3. ПОДКЛЮЧЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЯЧЕЙКИ К ПЛАТЕ СБОРА ДАННЫХ

Схема подключения измерительной ячейки к персональному компьютеру представлена на рис. 3.3.

Обозначения 1, 2, 3, 4 и 5 рис. 3.3 совпадают с ранее использованными обозначениями на рис. 3.1 и 3.2. Кроме того, на рис. 3.3 обозначены [208]:

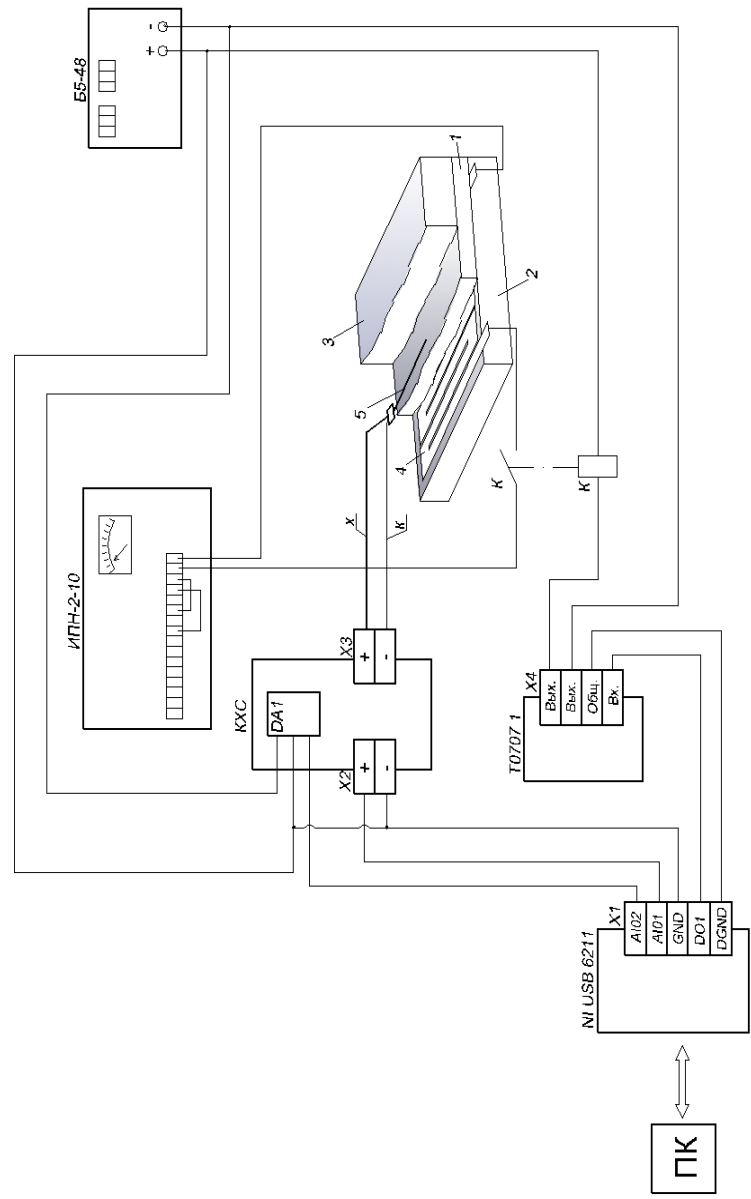


Рис. 3.3. Подключения измерительной ячейки к компьютеру [208]

– плата сбора данных (ПСД), в качестве которой использована плата NI USB6211 фирмы National Instruments, подключённая к персональному компьютеру ПК;

– коробка холодных спаев (КХС), в составе которой имеется интегральный датчик температуры DA1, используемый для введения поправок на температуру свободных концов термопары, изготовленной из хромелевого (х) и копелевого (к) проводов, подключаемых к разъёму X3; отметим, что подключение КХС со стороны разъёма X2 к плате сбора данных ПСД осуществляется обычными медными проводами; информация об измеренной температуре с DA1 подаётся на входы A102 и GND платы сбора данных ПСД;

– бесконтактное реле T0707 1, управляющее работой промежуточного реле К по команде с платы NI USB6211; это реле К через свой контакт обеспечивают подачу напряжения питания (с источника постоянного напряжения ИПН-2-10) на электрический нагреватель 4 измерительной ячейки;

– второй источник питания Б5-48 используется для питания промежуточного реле К и интегрального датчика температуры DA1.

3.1.4. АЛГОРИТМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИИУС

Порядок выполнения процессов изготовления и подготовки элементов образца к эксперименту, осуществления измерительных операций, сбора и проведения обработки первичной информации с последующим вычислением значений искомых теплофизических свойств проиллюстрирован на рис. 3.4 в виде поточной диаграммы. Алгоритм функционирования ИИУС предусматривает (рис. 3.4) выполнение следующих стадий (этапов) работы [208]:

1. Подготовка трёх элементов образца к измерению теплофизических свойств, измерение их размеров и монтаж в измерительной ячейке.

2. Проведение подготовительной стадии, контроль степени её завершенности и информирование оператора об окончании этой стадии.

3. Осуществление активной стадии, в том числе, определение максимального значения температуры T_{\max} и проверка критерия окончания активной стадии эксперимента.

4. Обработка экспериментальных данных по расчётным зависимостям [201], сохранение результатов в базе данных и, при необходимости, вывод протокола испытаний на принтер.

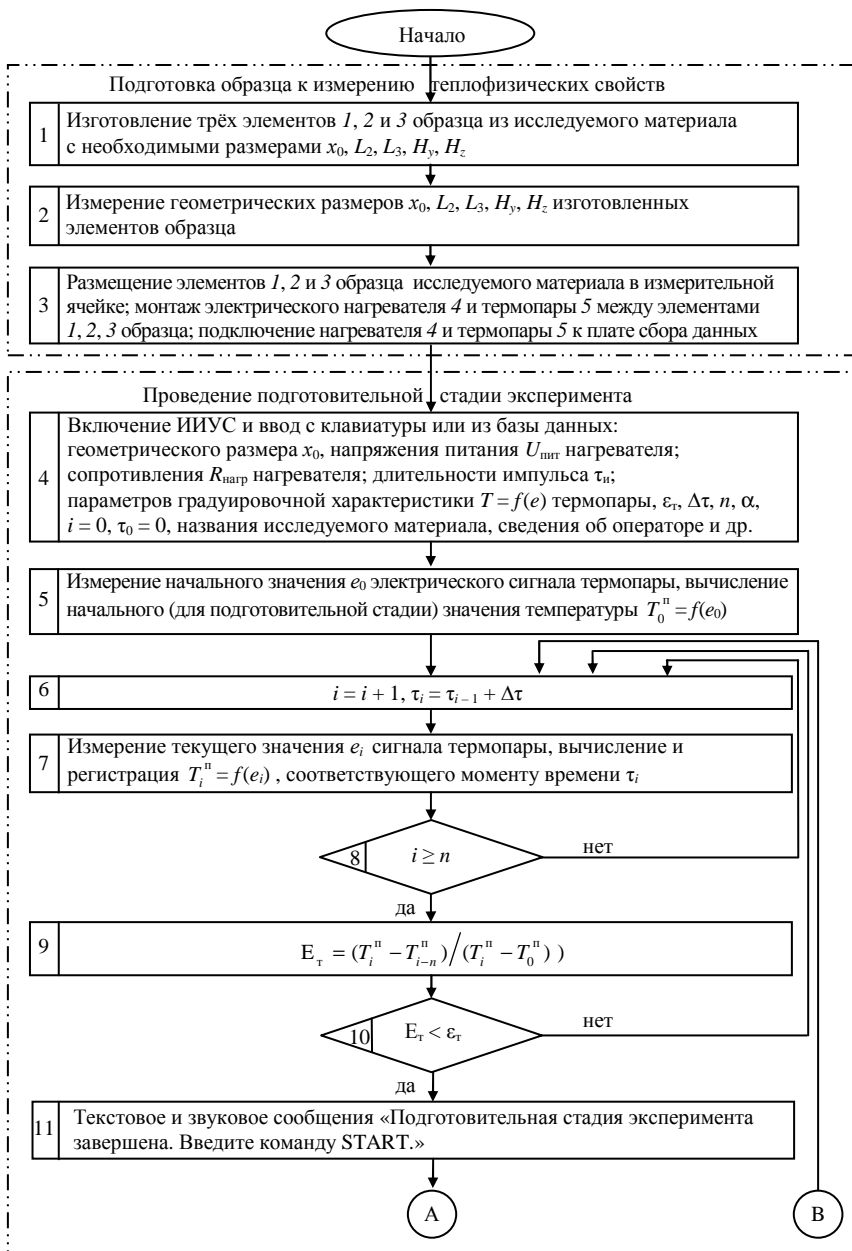


Рис. 3.4. Поточная диаграмма, иллюстрирующая алгоритм работы информационно-измерительной управляющей системы [208] (начало)

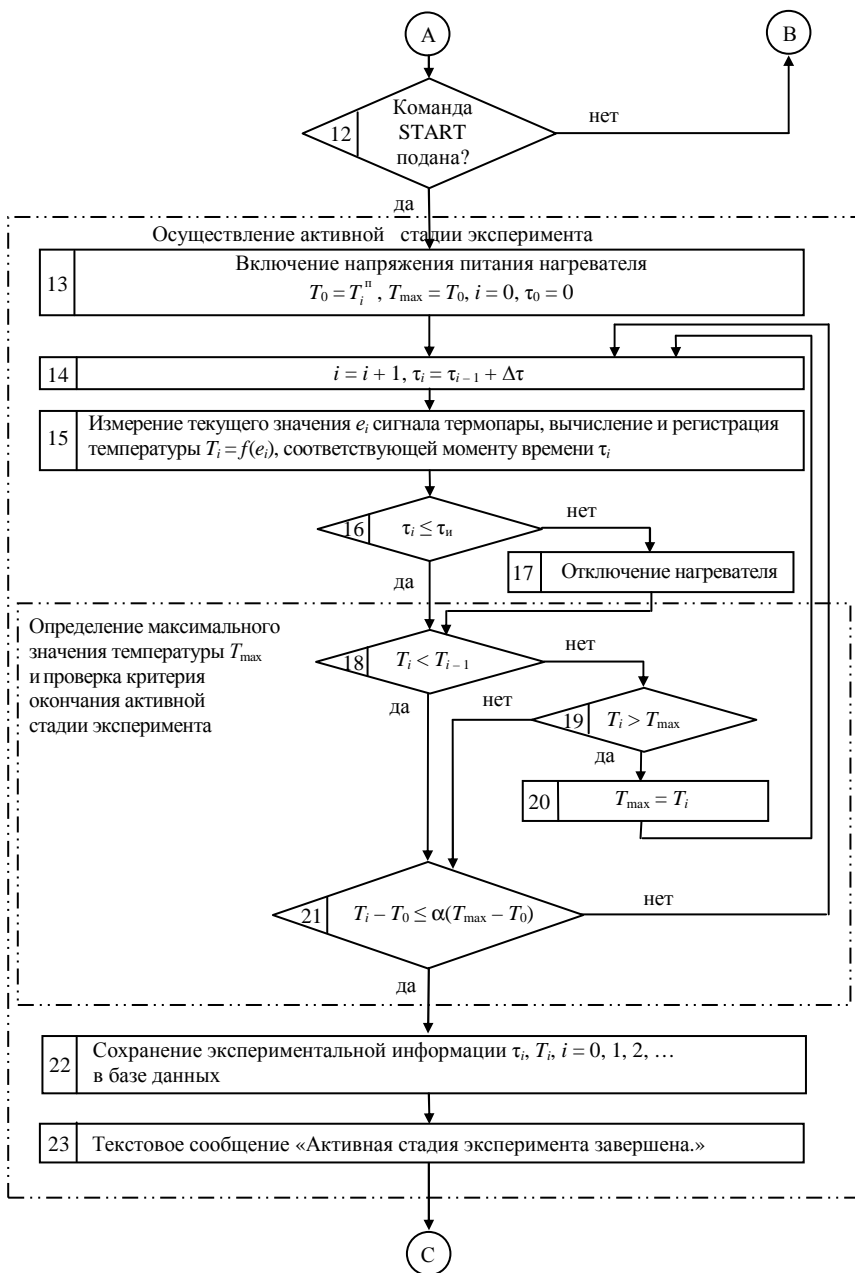


Рис. 3.4 (продолжение)

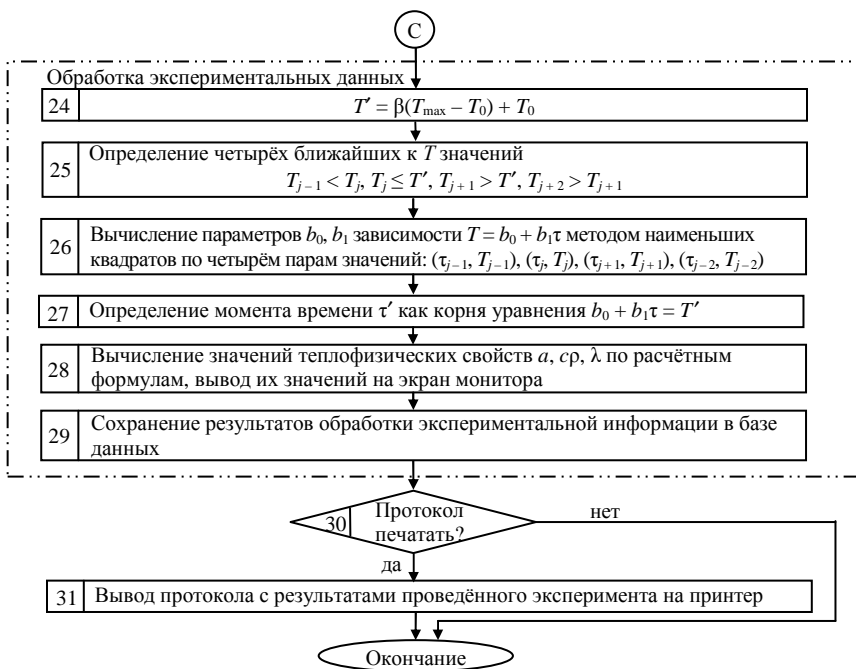


Рис. 3.4. (окончание)

* * *

Выполненные на начальных этапах работы экспериментальные измерения теплофизических свойств образцов, изготовленных из полиметилметакрилата с хорошо известными свойствами $a \approx 1,06 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, $\lambda \approx 0,196 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$, $ср \approx 1,85 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{град})$, показали, что изготовленная экспериментальная установка и разработанный метод плоского «мгновенного» источника теплоты обеспечивают измерения a , λ , $ср$ с приемлемыми для технических измерений погрешностями в пределах 7...15%.

3.2. ОЦЕНКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЁРДЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДА ПЛОСКОГО «МГНОВЕННОГО» ИСТОЧНИКА ТЕПЛОТЫ И ИЗГОТОВЛЕННОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В данном параграфе приводятся основные сведения о полученных в процессе выполнения работы результатах теоретического и экспериментального оценивания погрешностей измерения теплофизических свойств с применением метода плоского «мгновенного» источника теплоты и изготовленной экспериментальной установки.

3.2.1. ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

Рассматриваемый в данной работе метод плоского «мгновенного» источника теплоты относится к так называемым косвенным методам измерений [14, 27 – 30, 186, 200, 206, 209, 217, 219, 220], так как в ходе эксперимента измеряется не сама интересующая нас физическая величина (коэффициент температуропроводности a , объёмная теплоёмкость c_p , теплопроводность λ), а другие величины (температура; количество теплоты, выделившееся в единице площади плоского нагревателя; время; геометрические размеры и др.), по значениям которых вычисляют искомые значения a , c_p , λ , поэтому оценку погрешностей измерений искомых теплофизических свойств можно производить на основе двух подходов [206, 219, 220].

Первый подход состоит в следующем. С использованием положений и рекомендаций метрологии следует определить абсолютные погрешности $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$, и/или относительные погрешности $\delta x_1 = \Delta x_1/x_1, \delta x_2 = \Delta x_2/x_2, \dots, \delta x_n = \Delta x_n/x_n$ непосредственно измеряемых физических величин x_1, x_2, \dots, x_n , а для вычисления относительной погрешности δY искомой теплофизической величины Y , рассчитываемой по формуле

$$Y = F(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (3.1)$$

воспользоваться известным в метрологии соотношением [206, 219, 220]

$$\delta Y = \frac{\Delta Y}{Y} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{F(x_1, x_2, \dots, x_n)} \frac{\partial F(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_i} \Delta x_i \right]^2}. \quad (3.2)$$

Второй подход. При использовании второго подхода по экспериментальным данным следует вычислить значения искомой теплофизической величины

$$Y_j = F(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj}), \quad j = 1, 2, \dots, m,$$

а затем произвести обработку полученной выборки результатов измерений Y_1, Y_2, \dots, Y_m так же, как и в случае определения погрешностей прямых измерений путём статистической обработки результатов многократных наблюдений [206, 219, 220].

Первый подход был использован в данной работе для приближительной оценки погрешностей измерения искомых теплофизических свойств a , c_p ещё на этапе проектирования метода и измерительного устройства (до начала изготовления экспериментальной установки), так как погрешности определения непосредственно измеряемых величин уже можно было оценить по классам точности (метрологическим характеристикам) технических средств измерений, которые планировали применить

в составе создаваемой информационно-измерительной и управляющей системы (ИИУС). Результаты (полученные с применением теоретического подхода) оценки погрешностей предложного метода приведены в параграфе 2.2 второй главы.

Недостатком этого первого подхода, основанного на метрологическом анализе погрешностей косвенных измерений искомых теплофизических свойств с применением ранее полученных во второй главе расчётных формул (2.6), (2.6а), (2.7), (2.7а), является то, что этот метод не учитывает источники погрешностей, обусловленные принятыми при выводе расчётных формул допущениями и упрощениями, например, допущениями о возможности:

- пренебречь тепловыми сопротивлениями на поверхностях контакта составных частей (элементов) используемого образца исследуемого теплоизоляционного материала;

- пренебречь геометрическими размерами и собственной теплоёмкостью как плоского электрического нагревателя, так и используемого первичного измерительного преобразователя (ПИП) температуры;

- пренебречь влиянием конечной длительности τ_n импульса электрической мощности, подаваемой на плоский электрический нагреватель и др.

Оценить влияние таких источников погрешностей удалось только на дальнейшем этапе работы после начала экспериментальных измерений искомых теплофизических свойств с применением изготовленного измерительного устройства (для реализации метода плоского «мгновенного» источника теплоты), подключённого к используемой ИИУС, причём, на этом этапе пользовались вторым подходом к оценке погрешностей косвенных многократных измерений.

3.2.2. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ ИСКОМЫХ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Помимо рассмотренных в параграфе 2.3 второй главы итогов анализа источников погрешностей, связанных с определёнными допущениями и упрощениями, принятыми при формулировании используемой математической модели и выводе расчётных формул (для вычисления искомых теплофизических свойств), на результаты экспериментального измерения коэффициента температуропроводности, объёмной теплоёмкости и теплопроводности оказывают влияние источники погрешностей, обусловленные конечной точностью измерения:

- геометрических размеров составных частей-элементов образцов исследуемых теплоизоляционных материалов используемого плоского нагревателя и др.;

– текущих значений температуры $T(x_0, \tau)$, измеряемой и регистрируемой термопарой на расстоянии x_0 от плоскости размещения электрического нагревателя;

– электрической мощности P , потребляемой нагревателем и длительности τ_n теплового импульса, по значениям которых вычисляется количество теплоты $Q_n = P\tau_n$, выделившейся в единице поверхности нагревателя в начале активной стадии проведения процесса измерения;

– моментов времени $\tau_i, i = 1, 2, \dots, k$, используемых при обработке экспериментальных данных, в том числе, при определении значения момента времени τ' , в котором достигается заданное значение безразмерного параметра

$$\beta = \frac{T(x_0, \tau) - T_0}{T_{\max} - T_0},$$

введённого в рассмотрение в параграфе 2.2 второй главы и в статье [201].

Первый подход к теоретической оценке погрешностей косвенных измерений позволяет легко оценить влияние перечисленных источников погрешностей на точность определения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов. Результаты применения первого подхода для предварительной оценки погрешностей измерения коэффициента температуропроводности a и объёмной температуры c_p изложены в статье [201] и в параграфе 2.2 второй главы. Именно эти результаты послужили основой для выбора оптимальных режимных параметров используемого метода плоского «мгновенного» источника теплоты и рациональных конструктивных размеров измерительного устройства для реализации этого метода.

3.2.3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОЦЕНИВАНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДА ПЛОСКОГО «МГНОВЕННОГО» ИСТОЧНИКА ТЕПЛОТЫ И ИЗГОТОВЛЕННОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

После изготовления экспериментальной установки, включающей в себя измерительное устройство, подключённое к информационно-измерительной и управляющей системе, была выполнена работа по измерению теплофизических свойств ряда материалов с известными значениями теплопроводности λ и, в некоторых случаях, коэффициента температуропроводности a и объёмной теплоёмкости c_p .

Сведения о значениях теплофизических свойств материалов, использованных на этом этапе работы в качестве образцовых мер, приведены в табл. 3.1

3.1. Сведения о значениях теплофизических свойств образцов материалов, использованных в качестве образцовых мер на этапе экспериментального оценивания погрешностей измерения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов

№ п/п	Название материала	Значения теплофизических свойств			Источник данных
		Теплопроводность λ , Вт/(м·град)	Объёмная теплоёмкость φ , Дж/(м ³ ·град)	Коэффициент температуропроводности a , м ² /с	
1	Полиметилметакрилат (органическое стекло)	0,196	$1,85 \cdot 10^6$	$1,06 \cdot 10^{-7}$	[1, 32, 70]
2	Плиты полистирольные вспененные экструзионные «Европлэкс»	0,0298	–	–	[221]

Проведение экспериментов с материалами с известными значениями теплофизических свойств

Для того, чтобы получить экспериментальные оценки относительных погрешностей измерения теплофизических свойств с применением разработанного метода плоского «мгновенного» источника теплоты и изготовленной измерительной установки (подключённой к информационно-измерительной и управляющей системе), была выполнена работа, предусматривавшая выполнение следующих действий.

1. Из материалов с известными теплофизическими свойствами (см. табл. 3.1) были изготовлены образцы (рис. 3.2) в виде трёх составных частей:

- центральная пластина толщиной $x_0 = 6$ мм;
- нижняя 2 и верхняя 3 пластины толщиной $L_2 = L_3 = 60$ мм.

Размеры $H_y = H_z = 90$ мм этих пластин по координатам y и z были выбраны исходя из геометрических размеров плоского нагревателя 4.

2. При подготовке к проведению экспериментов наибольшее внимание уделялось точности и тщательности изготовления центральной пластины 1 и измерению её толщины $x_0 = 6$ мм.

3. При монтаже образца в измерительной ячейке плоский нагреватель 4 размещали между нижней пластиной 2 и центральной пластиной 1, а термопару 5 размещали между центральной пластиной 1 и верхней пластиной 3.

4. На подготовительной стадии каждого эксперимента с использованием термопары 5 контролировали температуру $T^n(x_0, \tau)$ и, после выполнения критерия

$$E_T = (T_i^n - T_{i-n}^n) / (T_i^n - T_0^n) \leq \varepsilon_T$$

приступали к осуществлению активной стадии.

5. В начале активной стадии эксперимента в течение промежутка времени $0 < \tau < \tau_n$ на плоский нагреватель 4 подавали постоянную электрическую мощность P , что обеспечивало подвод постоянного количества теплоты $Q_n = P\tau_n$ к плоскости $x = 0$ в каждом эксперименте.

6. В дальнейшем на протяжении всей активной стадии с постоянным шагом во времени Δt измеряли и регистрировали значения температуры $T_i = T(x_0, \tau_i)$ и соответствующих моментов времени $\tau_i = \tau_{i-1} + \Delta t$, $i = 1, 2, \dots, \tau_0 = 0$. После достижения максимального значения температуры $T_{\max} = T(x_0, T_{\max})$ начинали вычислять и контролировать значения критерия окончания активной стадии

$$\beta = \frac{T_i - T_0}{T_{\max} - T_0} \leq \alpha, \quad (3.3)$$

где α – наперед заданное число из диапазона значений $0,9 \leq \alpha \leq 0,99$.

После выполнения условия (3.3) активная стадия эксперимента завершалась, а полученные экспериментальные данные в виде массива пар значений (T_i, τ_i) , $i = 0, 1, 2, \dots, k$ сохранялись в базе данных в компьютере, где k – номер последнего шага измерения на активной стадии эксперимента.

7. Далее производилась обработка полученных экспериментальных данных в соответствии с алгоритмом, изложенным в параграфе 3.1 данной главы, а вычисленные значения теплофизических свойств также сохранялись в базе данных.

В дальнейшем эти полученные и внесённые в базу данных результаты определения теплофизических свойств были использованы для оценки реальных относительных погрешностей измерения с применением разработанного метода и изготовленной экспериментальной установки. Для каждого материала с известным значением теплофизических свойств проводили 5 – 7 экспериментов.

Обработка полученных экспериментальных данных с целью оценки значений погрешностей измерения материалов с известными значениями теплофизических свойств

После завершения многократных экспериментальных измерений значений коэффициента температуропроводности a , теплопроводности λ и объёмной теплоёмкости c_p материалов с известными значениями теплофизических свойств, приступали к статистической обработке полученных результатов.

В процессе обработки результатов многократных измерений теплофизических свойств (представленных в виде выборки $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$) вычисляли.

1. Среднеарифметическое значение конкретного теплофизического свойства

$$\bar{\varphi} = \frac{\varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n}{n},$$

где n – объём случайной выборки, полученной в процессе проведения экспериментальных измерений рассматриваемого теплофизического свойства φ . Отметим, что в нашей работе под величиной φ понимаются коэффициент температуропроводности a , объёмная теплоёмкость c_p или теплопроводность λ .

2. Величину s_n , необходимую для выявления возможных промахов (грубых погрешностей) в рассматриваемой выборке, по формуле

$$s_n = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\varphi_i - \bar{\varphi})^2}. \quad (3.4)$$

3. Значение величины V (для выявления промахов) по формуле

$$V = \frac{\varphi_{\max} - \bar{\varphi}}{s_n} \quad (3.5)$$

или

$$V = \frac{\bar{\varphi} - \varphi_{\min}}{s_n}, \quad (3.6)$$

где φ_{\max} , φ_{\min} – максимальное и минимальное значение теплофизического свойств φ в имеющейся выборке, а затем сравнивали полученное значение V с максимальным возможным значением V_{\max} для доверительной вероятности $\alpha = 0,95$. Значения величины V_{\max} для объёмов выборки $3 \leq n \leq 10$ приведены в табл. 3.2.

**3.2. Значения величины V_{\max} и коэффициента Стьюдента $t_{\alpha n}$
в зависимости от объёма выборки n
при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ [220]**

n	3	4	5	6	7	8	9	10
V_{\max}	1,41	1,69	1,87	2,00	2,09	2,17	2,24	2,29
$t_{\alpha n}$	4,30	3,18	2,78	2,57	2,45	2,36	2,31	2,26

Если рассчитанное значение V оказывалось $V > V_{\max}$, то принималось решение, что значение Φ_{\max} (либо Φ_{\min}) является промахом (грубой погрешностью) и его следует исключить из исходной выборки.

После исключения выявленной грубой погрешности (промаха) из выборки, оставшиеся значения повторно обрабатывались в соответствии с изложенными выше пунктами 1 – 3 данной методики.

После выявления и отбрасывания всех имеющихся промахов (грубых погрешностей) приступали к дальнейшей обработке оставшихся в выборке значений теплофизических свойств.

4. Величину исправленного выборочного среднеквадратичного отклонения S_n по формуле

$$S_n = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\varphi_i - \bar{\varphi})^2}, \quad (3.7)$$

где n – объём выборки, оставшейся после отбрасывания грубых погрешностей (промахов); $\bar{\varphi}$ – среднее арифметическое значение элементов φ_i , оставшихся в рассматриваемой выборке.

5. С использованием значения коэффициента Стьюдента $t_{\alpha n}$, определённого по табл. 3.2 при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$, вычисляли значения:

– абсолютной среднеквадратичной погрешности среднеарифметического значения $\bar{\varphi}$

$$\Delta \bar{\varphi} = S_n \frac{t_{\alpha n}}{\sqrt{n}}; \quad (3.8)$$

– относительной среднеквадратичной погрешности среднеарифметического значения $\bar{\varphi}$

$$\delta \bar{\varphi} = \frac{\Delta \bar{\varphi}}{\bar{\varphi}} 100\% = \frac{S_n}{\bar{\varphi}} \frac{t_{\alpha n}}{\sqrt{n}} 100\%, \quad (3.9)$$

после чего, результаты измерения представляли в виде

$$\bar{\varphi} - \Delta \bar{\varphi} \leq \varphi \leq \bar{\varphi} + \Delta \bar{\varphi}, \quad \text{при } \alpha = 0,95$$

или

$$\varphi = \bar{\varphi} \pm \delta\bar{\varphi}\%, \text{ при } \alpha = 0,95.$$

6. Систематическую погрешность $\varepsilon\bar{\varphi}$ среднеарифметического значения φ вычисляли по формуле

$$\varepsilon\bar{\varphi} = \frac{\bar{\varphi} - \varphi_T}{\varphi_T} 100\%, \quad (3.10)$$

где φ_T – точное значение теплофизического свойства, приведённое в табл. 3.1, определённое по справочным данным [1, 32, 70, 221, 222, 223].

Результаты обработки выборок, полученных в процессе измерений теплофизических свойств:

– образцов, изготовленных из плит полистирольных вспененных экструзионных «Европлэкс» [221];

– образцов, изготовленных из полиметилметакрилата (органического стекла [1, 32, 70, 224]), представлены ниже в табл. 3.3 – 3.9.

Результаты экспериментального измерения теплофизических свойств (коэффициента температуропроводности a , теплопроводности λ и объёмной теплоёмкости $ср$) образцов, изготовленных: 1) из материалов плит полистирольных вспененных экструзионных «Европлэкс» с табличным значением теплопроводности $\lambda_T = 0,0298$ Вт/(м·град); 2) из полиметилметакрилата (органического стекла [1, 32, 70, 224]) с табличными значениями коэффициента температуропроводности $a_T = 1,06 \cdot 10^{-7}$ м²/с, теплопроводности $\lambda_T = 0,196$ Вт/м·град и объёмной теплоёмкости $(ср)_T = 1,85 \cdot 10^6$ Дж/(м³·град), представлены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

№ п/п	Полиметилметакрилат (стекло органическое)			Плиты полистирольные вспененные экструзионные «Европлэкс»		
	$a \cdot 10^7$, м ² /с	λ , Вт/(м·град)	$ср \cdot 10^{-6}$, Дж/(м ³ ·град)	$a \cdot 10^7$, м ² /с	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·град)	$ср \cdot 10^{-5}$, Дж/(м ³ ·град)
1	0,907	0,195	2,14	2,063	2,928	1,419
2	0,917	0,188	2,05	2,017	2,675	1,326
3	0,908	0,197	2,17	2,012	2,730	1,357
4	0,949	0,200	2,10	2,057	2,787	1,355
5	0,893	0,190	2,13	1,967	2,633	1,339
6	0,877	0,189	2,16	1,989	2,607	1,311

Результаты обработки экспериментальных данных, полученных при измерении теплопроводности λ плит полистирольных вспененных экструзионных «Европлэкс» (эксперименты проведены с целью оценки реальных значений случайных и систематических относительных погрешностей измерения теплопроводности с применением разработанного метода плоского «мгновенного» источника теплоты и изготовленной экспериментальной установки), представлены в табл. 3.4.

Результаты обработки экспериментальных данных, полученных при измерении коэффициента температуропроводности a образцов из плит полистирольных вспененных экструзионных «Европлэкс» (эксперименты проведены с целью оценки реальных значений случайных относительных погрешностей измерения коэффициента температуропроводности с применением разработанного метода плоского «мгновенного» источника теплоты и изготовленной экспериментальной установки), представлены в табл. 3.5.

Результаты обработки экспериментальных данных, полученных при измерении объёмной теплоёмкости c_p образцов плит полистирольных вспененных экструзионных «Европлэкс» (эксперименты проведены для оценки значений случайных относительных погрешностей измерения объёмной теплоёмкости с применением разработанного метода плоского «мгновенного» источника теплоты и изготовленной экспериментальной установки), представлены в табл. 3.6.

Результаты обработки экспериментальных данных, полученных при измерении теплопроводности λ образцов из полиметилметакрилата (эксперименты проведены с целью оценки реальных значений случайных и систематических относительных погрешностей измерения теплопроводности с применением разработанного метода плоского «мгновенного» источника теплоты и изготовленной экспериментальной установки), представлены в табл. 3.7.

Результаты обработки экспериментальных данных, полученных при измерении коэффициента температуропроводности a образцов из полиметилметакрилата (эксперименты проведены с целью оценки реальных значений случайных и систематических относительных погрешностей измерения коэффициента температуропроводности с применением разработанного метода плоского «мгновенного» источника теплоты и изготовленной экспериментальной установки), представлены в табл. 3.8.

Результаты обработки экспериментальных данных, полученных при измерении объёмной теплоёмкости c_p образцов из полиметилметакрилата (эксперименты проведены для оценки значений случайных и систематических относительных погрешностей измерения объёмной теплоёмкости с применением разработанного метода плоского «мгновенного» источника теплоты и изготовленной экспериментальной установки), представлены в табл. 3.9.

Таблица 3.4

№ п/п	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·град)	$\bar{\lambda} \cdot 10^2$, Вт/(м·град)	$S_n \cdot 10^2$, Вт/(м·град)	V	V_{\max}	$S_n \cdot 10^2$, Вт/(м·град)	$\Delta \bar{\lambda} \cdot 10^2$, Вт/(м·град)	$\delta \bar{\lambda} = \frac{\Delta \bar{\lambda}}{\bar{\lambda}} 100\%$	$\varepsilon \bar{\lambda} = \frac{\bar{\lambda} - \lambda_t}{\lambda_t} 100\%$
1	2,928	2,726	0,10792	1,877	2,00	0,11828	0,1241	4,55%	-8,52%
2	2,675								
3	2,730								
4	2,787								
5	2,633								
6	2,607								

Таблица 3.5

№ п/п	$a \cdot 10^7$, м ² /с	$\bar{a} \cdot 10^7$, м ² /с	$S_n \cdot 10^7$, м ² /с	V	V_{\max}	$S_n \cdot 10^7$, м ² /с	$\Delta \bar{a} = \frac{S_n t_{\text{см}} \cdot 10^7}{\sqrt{n}}$, м ² /с	$\delta \bar{a} = \frac{\Delta \bar{a}}{\bar{a}} 100\%$
1	2,063	2,0175	0,03421	1,476	2,00	0,03748	0,03932	1,95%
2	2,017							
3	2,012							
4	2,057							
5	1,967							
6	1,989							

Таблица 3.6

№ п/п	$c\rho \cdot 10^{-5}$, Дж/(м ³ ·град)	$\bar{c}\bar{\rho} \cdot 10^{-5}$, Дж/(м ³ ·град)	$S_n \cdot 10^{-5}$, Дж/(м ³ ·град)	V	V_{\max}	$S_n \cdot 10^{-5}$, Дж/(м ³ ·град)	$\Delta c\bar{\rho} = \frac{S_n t_{\text{ан}} \cdot 10^{-5}}{\sqrt{n}}$, Дж/(м ³ ·град)	$\delta c\bar{\rho} = \frac{\Delta c\bar{\rho}}{c\bar{\rho}} 100\%$
1	1,419	1,361	0,03783	1,529	2,0	0,04144	0,04261	3,13%
2	1,326							
3	1,357							
4	1,355							
5	1,399							
6	1,311							

Таблица 3.7

№ п/п	λ , Вт/(м·град)	$\bar{\lambda}$, Вт/(м·град)	$S_n \cdot 10^7$, Вт/(м·град)	V	V_{\max}	S_n , Вт/(м·град)	$\Delta \bar{\lambda} = \frac{S_n t_{\text{ан}}}{\sqrt{n}}$, Вт/(м·град)	$\delta \bar{\lambda} = \frac{\Delta \bar{\lambda}}{\bar{\lambda}} 100\%$	$\varepsilon \bar{\lambda} = \frac{\bar{\lambda} - \lambda_T}{\lambda_T} 100\%$
1	0,195	0,1932	0,004450	1,535	2,00	0,004875	0,005115	2,64%	-1,45%
2	0,188								
3	0,197								
4	0,200								
5	0,190								
6	0,189								

Таблица 3.8

№ п/п	$a \cdot 10^7,$ м ² /с	$\bar{a} \cdot 10^7,$ м ² /с	$S_n,$ м ² /с	V	V_{\max}	$S_n,$ м ² /с	$\Delta \bar{a} = \frac{S_n t_{\text{отн}}}{\sqrt{n}},$ м ² /с	$\delta \bar{a} = \frac{\Delta \bar{a}}{\bar{a}} 100\%$	$\varepsilon \bar{a} = \frac{\bar{a} - \bar{a}_T}{a_T}$
1	0,907	0,9085	0,02216	1,827	2,00	0,02428	0,02547	2,80%	-14,29%
2	0,917								
3	0,908								
4	0,949								
5	0,893								
6	0,877								

Таблица 3.9

№ п/п	$c_p,$ Дж/(м ³ ·град)	$\bar{c}_p,$ Дж/(м ³ ·град)	$S_n,$ Дж/(м ³ ·град)	V	V_{\max}	$S_n,$ Дж/(м ³ ·град)	$\Delta \bar{c}_p = \frac{S_n t_{\text{отн}}}{\sqrt{n}},$ Дж/(м ³ ·град)	$\delta \bar{c}_p = \frac{\Delta \bar{c}_p}{\bar{c}_p} 100\%$	$\varepsilon \bar{c}_p = \frac{\bar{c}_p - c_{pT}}{c_{pT}} 100\%$
1	2,14	2,125	0,04031	1,861	2,00	0,04416	0,04333	2,18%	+14,86%
2	2,05								
3	2,17								
4	2,10								
5	2,13								
6	2,16								

3.3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВВЕДЕНИЯ ПОПРАВОК НА СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

На основе сформулированных в параграфе 2.4 второй главы рекомендаций по разработке методики введения поправок на систематические погрешности измерения теплофизических свойств веществ, приведённые в параграфе 3.2 результаты экспериментальных измерений теплопроводности λ образцов (изготовленных из полиметалкрилата (органического стекла) и из плит полистирольных вспененных экструзионных типа «Европлэкс») были обработаны и представлены в табл. 3.10.

Содержащиеся в табл. 3.10 средние значения теплопроводности $\bar{\lambda}$ и точные (табличные) значения λ_T теплопроводности для материала плит полистирольных вспененных экструзионных

$$\bar{\lambda} = 0,02726 \text{ Вт/(м·град)}, \quad \lambda_T = 0,0298 \text{ Вт/(м·град)}$$

3.10. Исходные данные для определения параметров линейной зависимости $\lambda_{\text{исп}} = \alpha_0 + \alpha_1 \lambda_{\text{изм}}$, применяемой для введения поправок на систематические погрешности измерений

№ п/п	Плиты полистирольные вспененные экструзионные «Европлэкс»			Полиметилметакрилат (органическое стекло)		
	Измеренные значения $\lambda_{\text{изм}}$, Вт/(м·град)	Среднее значение $\bar{\lambda}$, Вт/(м·град)	Точное значение λ_T , Вт/(м·град)	Измеренные значения $\lambda_{\text{изм}}$, Вт/(м·град)	Среднее значение $\bar{\lambda}$, Вт/(м·град)	Точное значение λ_T , Вт/(м·град)
1	0,02928	0,02726	0,0298	0,195	0,1932	0,196
2	0,02675			0,188		
3	0,02730			0,197		
4	0,02787			0,200		
5	0,02633			0,190		
6	0,02607			0,189		

и для полиметилметакрилата

$$\bar{\lambda} = 0,1932 \text{ Вт/(м·град)}, \quad \lambda_T = 0,196 \text{ Вт/(м·град)}$$

были использованы для определения параметров α_0 и α_1 линейной зависимости

$$\lambda_{\text{исп}} = \alpha_0 + \alpha_1 \lambda_{\text{изм}}, \quad (3.11)$$

являющейся основой разработанной методики введения поправок в результаты измерений. Здесь использованы обозначения: $\lambda_{\text{изм}}$ – измеренное (полученное в процессе эксперимента) значение теплопроводности; $\lambda_{\text{исп}}$ – исправленное значение теплопроводности (после введения поправки на систематическую погрешность измерения).

На основе имеющихся в табл. 3.10 экспериментальных данных была составлена система уравнений для вычисления значений параметров α_0 , α_1 зависимости (3.11), а именно:

$$\begin{cases} \alpha_0 + 0,02726 \cdot \alpha_1 = 0,0298; & (3.11a) \\ \alpha_0 + 0,1932 \cdot \alpha_1 = 0,196. & (3.11b) \end{cases}$$

После вычитания уравнения (3.11a) из (3.11b), получаем:

$$(0,1932 - 0,02726) \alpha_1 = 0,196 - 0,0298;$$

$$0,16594 \cdot \alpha_1 = 0,1662;$$

$$\alpha_1 = 1,0015668.$$

Подставив полученное значение α_1 в (3.11a), получаем

$$\alpha_0 = 0,0298 - 0,02726 \cdot 1,0015668 = 0,0298 - 0,027327 = 0,0024973.$$

Таким образом, искомая зависимость для введения поправок в результаты измерения теплопроводности принимает вид

$$\lambda_{\text{исп}} = 0,0024973 + 1,0015668 \cdot \lambda_{\text{изм}}.$$

В связи с тем, что для плит полистирольных вспененных экструзионных «Европлэкс» в настоящее время нет точных данных о значениях их объёмной теплоёмкости c_p и коэффициента температуропроводности a , нам не удалось найти параметры зависимости типа (3.11) для введения поправок на систематические погрешности измерения c_p и a . В дальнейшем, с появлением сведений о точных значениях объёмной теплоёмкости c_p и коэффициента температуропроводности a , можно будет разработать алгоритмы для введения поправок в результаты измерения этих теплофизических свойств c_p и a .

3.4. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МГНОВЕННОГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДРЕВЕСИНЫ

Теплофизические характеристики материалов, такие как теплопроводность, теплоёмкость, коэффициент температуропроводности важно знать для контроля качества теплоизоляции, оптимизации технологических процессов, а также для определения и обеспечения условий пожарной и технической безопасности. Основным методом получения знаний о теплофизических свойствах вещества по-прежнему остаётся эксперимент. В эксперименте определяется температурный отклик в исследуемом образце (после приложения к нему теплового воздействия) с последующим применением расчётных зависимостей для определения искомого значения теплофизических свойств материала. Эти зависимости получают путём решения обратных задач теплопроводности для конкретной конфигурации измерительного устройства и метода измерения.

Одним из перспективных методов измерения теплофизических характеристик веществ является метод плоского «мгновенного» источника теплоты, который позволяет за достаточно короткий промежуток времени определить объёмную теплоёмкость образца, его теплопроводность и коэффициент температуропроводности.

Расчётные формулы для вычисления искомого теплофизических свойств по результатам проведения эксперимента, обеспечивающие минимизацию погрешностей измерений, были получены выше во второй главе и имеют вид:

$$a = \frac{x_0^2}{4z'\tau'} ;$$
$$c\rho = \frac{Q_n}{[T_{\max} - T_0]x_0\sqrt{2\pi e}} ;$$
$$\lambda = ac\rho = \frac{Q_n x_0}{4\sqrt{2\pi e} z' \tau' [T_{\max} - T_0]} ,$$

где a , $c\rho$ – коэффициент температуропроводности и объёмная теплоёмкость материалов; x_0 – координата поверхности, в которой производится измерение температуры $T(x, \tau)$; z' , τ' – величины, определяемые в соответствии с расчётными формулами, представленными в параграфе 2.2 и в статье [201].

С использованием инструментов и методов управления качеством [202 – 204], был проведён подробный анализ источников возникновения погрешности измерения теплофизических характеристик, а также опреде-

лены пути повышения точности на основе оптимизации конструкционных размеров и режимных параметров проведения эксперимента. Это позволило разработать конструкцию измерительного устройства, программное обеспечение в лицензионной среде LabView и провести исследование образцов древесины из сосны, берёзы и древостали.

Для определения погрешности измерения теплопроводности эксперименты проводились параллельно на приборе ИТП-МГ4 и на разработанной авторами измерительной установке. Для исследования были изготовлены образцы древостали, берёзы и сосны, в виде пластин размером 90×90 мм и толщиной 6 мм и 60 мм. Значения теплопроводности и коэффициента температуропроводности древесины поперёк волокон, полученные на указанных приборах, приведены в табл. 3.11. Как видно из таблицы погрешность измерения теплопроводности не превышает 5%.

3.11. Результаты экспериментальных исследований

Материал	Результаты измерения теплопроводности прибором ИТП-МГ4, Вт/(м·К)	Результаты измерения с применением разработанной измерительной установки	
		Теплопроводность, Вт/(м·К)	Коэффициент температуропроводности, м ² /с, (×10 ⁷)
Древосталь	0,151	0,150	1,1
Берёза	0,146	0,142	1,4
Сосна	0,112	0,116	1,5

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В первых двух главах данной монографии главное внимание уделено теоретическим основам разработанного метода плоского «мгновенного» источника теплоты, предназначенного для измерения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов. При этом, в первой главе, на основе составленного обзора литературы и проведенного патентного поиска, сформулированы цели и задачи дальнейших исследований. Во второй главе изложены теоретические основы и порядок осуществления измерительных и вычислительных операций разработанного метода.

В третьей главе приведены результаты разработки измерительной установки и алгоритм функционирования используемой информационно-измерительной системы, изложены результаты экспериментального оценивания погрешностей разработанных метода и устройства при их практическом применении для измерения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов.

Желаем читателям успехов в разработке новых методов и устройств для измерения теплофизических свойств материалов, а также при применении таких методов и устройств для целей контроля и управления качеством процессов, продукции и услуг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Платунов, Е. С. Теплофизические измерения и приборы / Е. С. Платунов, С. Е. Буравой, В. В. Куренин, Г. С. Петров ; под ред. Е. С. Платунова. – Ленинград : Машиностроение, 1986. – 256 с.
2. Кондратьев, Г. М. Регулярный тепловой режим / Г. М. Кондратьев. – Москва : Гостехиздат, 1954. – 408 с.
3. Кондратьев, Г. М. Тепловые измерения / Г. М. Кондратьев. – Москва–Ленинград : Машгиз, 1957. – 244 с.
4. Цедерберг, Н. В. Теплопроводность газов и жидкостей / Н. В. Цедерберг. – Москва : Госэнергоиздат, 1963. – 468 с.
5. Филиппов, Л. П. Измерение тепловых свойств твёрдых и жидких металлов при высоких температурах / Л. П. Филиппов. – Москва : Изд-во МГУ, 1967. – 325 с.
6. Филиппов, Л. П. Исследование теплопроводности жидкостей / Л. П. Филиппов. – Москва : Изд-во МГУ, 1970. – 239 с.
7. Филиппов, Л. П. Измерение теплофизических свойств веществ методом периодического нагрева / Л. П. Филиппов. – Москва : Энергоиздат, 1984. – 105 с.
8. Теплопроводность газов и жидкостей / Н. Б. Варгафтик, Л. П. Филиппов, А. А. Тарзиманов и др. – Москва : Изд-во стандартов, 1970. – 155 с.
9. Теплопроводность жидкостей и газов. Справочные данные / Н. Б. Варгафтик, Л. П. Филиппов, А. А. Тарзиманов и др. – Москва : Изд-во стандартов, 1978. – 472 с.
10. Шашков, А. Г. Методы определения теплопроводности и температуропроводности / А. Г. Шашков и др. ; под ред. А. В. Лыкова. – Москва : Энергия, 1973. – 336 с.
11. Петухов, Б. С. Опытное изучение процессов теплопередачи / Б. С. Петухов. – Москва–Ленинград : Госэнергоиздат, 1952. – 344 с.
12. Геращенко, О. А. Основы теплотрии / О. А. Геращенко. – Киев : Наукова думка, 1971. – 191 с.
13. Геращенко, О. А. Тепловые и температурные измерения / О. А. Геращенко, В. Г. Федоров. – Киев : Наукова думка, 1965. – 304 с.
14. Осипова, В. А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена / В. А. Осипова. – Москва : Энергия, 1969. – 392 с.
15. Чудновский, А. Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов / А. Ф. Чудновский. – Москва : Физматгиз, 1962. – 456 с.
16. Пелецкий, В. Э. Высокотемпературные исследования тепло- и электропроводности твёрдых тел / В. Э. Пелецкий, Д. Л. Тимрот, В. Ю. Воскресенский. – Москва : Энергия, 1971. – 192 с.

17. Годовский, Ю. К. Теплофизические методы исследования полимеров / Ю. К. Годовский. – Москва : Химия, 1976. – 216 с.
18. Харламов, А. Г. Измерение теплопроводности твёрдых тел / А. Г. Харламов. – Москва : Атомиздат, 1973. – 152 с.
19. Черпаков, П. В. Теория регулярного теплообмена / П. В. Черпаков. – Москва : Энергия, 1975. – 224 с.
20. Шевельков, В. Л. Теплофизические характеристики изоляционных материалов / В. Л. Шевельков. – Москва – Ленинград : Госэнергоиздат, 1958. – 96 с.
21. Власов, В. В. Автоматические устройства для теплофизических измерений твёрдых материалов / В. В. Власов, М. В. Кулаков, А. И. Фесенко. – Тамбов : Изд-во ВНИИРТАМШ, 1972. – 160 с.
22. Власов, В. В. Теплофизические измерения : справочное пособие по методам расчёта полей, характеристик теплопереноса и автоматизации измерений / В. В. Власов, Ю. С. Шаталов и др. – Тамбов : Изд-во ВНИИРТАМШ, 1975. – 252 с.
23. Автоматические устройства для определения теплофизических характеристик твёрдых материалов / В. В. Власов, М. В. Кулаков, А. И. Фесенко и др. – Москва : Машиностроение, 1977. – 192 с.
24. Власов, В. В. Применение метода интегральных характеристик к исследованию проблемы восстановления параметров теплопереноса / В. В. Власов, Ю. С. Шаталов // Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. – Москва : ИВТАН, 1980. – № 5(25). – С. 3 – 43.
25. Пономарев, С. В. Обзор методов и устройств для измерения теплофизических свойств жидкостей при ламинарном режиме течения / С. В. Пономарев, А. Г. Дивин. – Тамбов : ТИХМ, 1990. – Деп. в ВИНТИ 26. 07. 90, № 42 – 65-В90.
26. Дивин, А. Г. Определение зависимости теплофизических характеристик неньютоновских жидкостей от скорости сдвига (обзор) / А. Г. Дивин, С. В. Мищенко, С. В. Пономарев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2009. – Т. 75, № 10. – С. 24 – 35.
27. Пономарев, С. В. Методы и устройства для измерения эффективных теплофизических характеристик потоков технологических жидкостей / С. В. Пономарев, С. В. Мищенко. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 1997. – 248 с.
28. Пономарев, С. В. Теоретические и практические аспекты теплофизических измерений : монография. В 2 кн. / С. В. Пономарев, С. В. Мищенко, А. Г. Дивин. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006. – Кн. 1. – 204 с.
29. Пономарев, С. В. Теоретические и практические аспекты теплофизических измерений : монография. В 2 кн. / С. В. Пономарев, С. В. Мищенко, А. Г. Дивин. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006. – Кн. 2. – 216 с.

30. Теоретические и практические основы теплофизических измерений / С. В. Пономарев, С. В. Мищенко, А. Г. Дивин и др. ; под ред. С. В. Пономарева. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 408 с.
31. Кравчун, С. Н. Метод периодического нагрева в экспериментальной теплофизике / С. Н. Кравчун, А. А. Липаев. – Казань : Изд-во Казанского университета, 2006. – 208 с.
32. Теплофизические измерения : учебное пособие / Е. С. Платунов, И. В. Баранов, С. Е. Буравой и др. ; под ред. Е. С. Платунова. – Санкт-Петербург : СПбГУНиПТ, 2010. – 738 с.
33. Беляев, Н. М. Методы теории теплопроводности : учебное пособие для вузов : в 2 ч. / Н. М. Беляев, А. А. Рядно. – Москва : Высшая школа, 1982. – 327 с.
34. Олейник, Б. Н. Точная калориметрия. / Б. Н. Олейник. – Москва : Изд-во стандартов, 1973. – 208 с.
35. Сергеев, О. А. Метрологические основы теплофизических измерений / О. А. Сергеев. – Москва : Изд-во стандартов, 1972. – 154 с.
36. Волькенштейн, В. С. Скоростной метод определения теплофизических характеристик материалов / В. С. Волькенштейн. – Ленинград : Энергия, 1971. – 144 с.
37. Коздоба, Л. А. Методы решения обратных задач теплопроводности / Л. А. Коздоба, П. Г. Круковский. – Киев : Наукова Думка, 1982. – 360 с.
38. Филиппов, П. И. Методы определения теплофизических свойств тел / П. И. Филиппов, А. М. Тимофеев. – Новосибирск : Наука, 1976. – 102 с.
39. Платунов, Е. С. Теплофизические измерения в монотонном режиме / Е. С. Платунов. – Ленинград : Энергия, 1973. – 144 с.
40. Ponomarev, S. V. Measurements of Thermophysical Properties by Laminar Flow Methods / S. V. Ponomarev, S. V. Mishchenko, T. F. Jr. Irvine. – New York : Begell House, Inc, 2001. – 274 p.
41. Карслоу, Г. С. Теплопроводность твёрдых тел / Г. С. Карслоу, Д. Егер. – Москва : Наука, 1964. – 487 с.
42. Карслоу, Г. С. Теория теплопроводности / Г. С. Карслоу. – Москва–Ленинград : ОГИЗ, 1947. – 288 с.
43. Карслоу, Г. Операционные методы в прикладной математике / Г. Карслоу, Д. Егер. – Москва : Гос. изд-во иностр. лит. , 1948. – 291 с.
44. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – Москва : Высшая школа, 1967. – 599 с.
45. Лыков, А. В. Теплообмен : справочник / А. В. Лыков. – Москва : Энергия, 1972. – 560 с.
46. Каргашев, Э. М. Аналитические методы в теплопроводности твёрдых тел / Э. М. Каргашев. – Москва : Высшая школа, 1979. – 415 с.
47. Тихонов, А. Н. Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – Москва : Наука, 1972. – 735 с.

48. Арсенин, В. Я. Методы математической физики и специальные функции / В. Я. Арсенин. – Москва : Наука, 1974. – 432 с.
49. Баранов, И. В. Автоматизированный цифровой измеритель теплоёмкости / И. В. Баранов и др. // Межвуз. сб. трудов. – Санкт-Петербург : СПбГАХПТ, 1995. – С. 17 – 20.
50. Буравой, С. Е. Измерение теплоёмкости веществ при криогенных температурах в режиме нагрева-охлаждения / С. Е. Буравой, Е. А. Богомазов, В. А. Самолетов. // Известия вузов. Приборостроение. – 1988. – Т. 31. – № 12. – С. 74 – 78.
51. Буравой, С. Е. Прибор для определения теплоёмкости / С. Е. Буравой, Г. Н. Кошаровский, Е. С. Платунов // Известия вузов. Приборостроение. – 1975. – Т. 18, № 2. – С. 111 – 115.
52. Автоматизированный цифровой измеритель теплоёмкости пищевых продуктов / А. О. Ключев, И. В. Баранов, Е. С. Платунов и др. // Межвуз. сб. трудов. – Санкт-Петербург : СПбГАХПТ, 1994. – С. 24 – 48.
53. Низкотемпературная калориметрия / под ред. С. А. Улыбина. – Москва : Мир, 1971. – 264 с.
54. Платунов, Е. С. Прибор для исследования теплопроводности и теплоёмкости в режиме монотонного разогрева / Е. С. Платунов, В. В. Курепин // Известия вузов. Сер. Приборостроение. – 1966. – Т. 9, № 3. – С. 127 – 130.
55. Платунов, Е. С. Импульсно-динамический метод измерения теплоёмкости металлов при температурах выше 1000 °С / Е. С. Платунов, В. Б. Федоров // ПТБ. – 1963. – № 7. – С. 53 – 56.
56. Баранов, И. В. Комплексное измерение теплофизических свойств в условиях монотонного разогрева / И. В. Баранов, А. А. Никитин // Известия СПбГУНиПТ. – 2006. – № 1. – С. 62 – 63.
57. Курепин, В. В. Применение кольцевых газовых прослоек для защиты боковой поверхности образца в стационарных методах измерения теплопроводности / В. В. Курепин, Н. В. Ниженский // Промышленная теплотехника. – 1982. – Т. 4, № 1. – С. 57 – 62.
58. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – Москва : Наука, 1973. – 832 с.
59. Геллер, З. И. Применение регулярного режима для исследования теплопроводности нефтепродуктов / З. И. Геллер, Ю. Л. Расторгуев // Химия и технология топлив и масел. – 1958. – № 10. – С. 114 – 118.
60. Мустафаев, Р. А. Прибор для определения теплопроводности жидкостей / Р. А. Мустафаев // Известия вузов. Сер. Приборостроение. – 1959. – Т. II. – № 6. – С. 43 – 47.
61. Назиев, Я. М. Расчётное уравнение для бикалориметра произвольной формы / Я. М. Назиев, И. Ф. Голубев // Известия АН Азербайджанской ССР. Серия физ.-математ. и техн. наук. – 1961. – № 3. – С. 143 – 148.

62. Балабанов, П. В. Метод исследования изменения теплофизических характеристик зерновых хемосорбентов в процессе хемосорбции // П. В. Балабанов, С. В. Пономарев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2012. – Т. 18, № 2. – С. 367 – 372.

63. Балабанов, П. В. Применение теории метода двух альф для исследования теплофизических характеристик регенеративных продуктов и химических поглотителей / П. В. Балабанов, С. В. Пономарев // Измерительная техника. – 2010. – № 11. – С. 45 – 49.

64. 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.

65. Пат. 2243543 Российская Федерация, МПК G01 N 25/18. Способ комплексного определения теплофизических характеристик материалов / Мищенко С. В., Пономарев С. В., Трофимов А. В., Балабанов П. В., Пономарева Е. С. ; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2003110027/28 ; заявл. 08. 04. 2003 ; опубл. 27. 12. 2004. Бюл. № 36. – 36 с. : ил.

66. Балабанов, П. В. Повышение точности метода двух альф при измерении теплофизических характеристик / П. В. Балабанов, С. В. Пономарев // Измерительная техника. – 2011. – № 2. – С. 57 – 60.

67. Повышение точности метода измерения теплофизических свойств за счёт выбора рациональных параметров проведения эксперимента и обработки опытных данных / С. В. Пономарев, П. В. Балабанов, В. Ф. Сорочинский, А. С. Щекочихин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2009. – Т. 15, № 4. – С. 718 – 728.

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

69. Балабанов, П. В. Повышение точности измерения температуропроводности путём введения критерия управления ходом измерения / П. В. Балабанов // Метрология, стандартизация, сертификация и управление качеством продукции : программа, материалы школы-семинара молодых ученых. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. – С. 93.

70. Балабанов, П. В. Методы и средства исследования характеристик тепло- и массопереноса регенеративных продуктов и поглотителей для систем жизнеобеспечения. Ч. 1: Методы и средства определения теплофизических характеристик : монография / П. В. Балабанов. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 96 с.

71. Макаров, В. С. Удельная теплоёмкость жидкой фракции свиного навоза / В. С. Макаров, В. П. Капустин, С. В. Пономарев // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. – 1977. – № 12. – С. 121 – 122.

72. Макаров, В. С. Измерения теплофизических свойств некоторых жидкостей методами ламинарного режима / В. С. Макаров, А. Я. Наумова, С. В. Пономарев // Автоматизация и комплексная механизация химико-технологических процессов. – Ярославль, 1978. – С. 84 – 87.

73. Методика введения поправки в результаты измерения теплофизических свойств / С. В. Пономарев, А. Г. Дивин, Р. В. Романов и др. // I научная конференция ТГТУ. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 1994. – С. 60 – 61.

74. Дивин, А. Г. Методы и средства для определения зависимости теплофизических характеристик жидких полимерных материалов от скорости сдвига и температуры : монография // А. Г. Дивин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2011. – 160 с.

75. Мустафаев, Р. А. Динамические методы измерения теплоёмкости при высоких давлениях и температурах / Р. А. Мустафаев, В. В. Курепин // Теплофизика высоких температур. – 1973. – Т. 11, № 1. – С. 144 – 149.

76. Краев, О. А. Измерение теплопроводности металлов в широком интервале температур за один опыт / О. А. Краев // Теплоэнергетика. – 1957. – № 2. – С. 69 – 72.

77. Краев, О. А. Метод определения зависимости температуропроводности от температуры за один опыт / О. А. Краев // Теплоэнергетика. – 1956. – № 4. – С. 44 – 48.

78. Краев, О. А. Метод определения теплопроводности жидкостей / О. А. Краев // Заводская лаборатория. – 1960. – № 2. – С. 183–184.

79. Бровкин, Л. А. Определение коэффициента температуропроводности при квазистационарном режиме / Л. А. Бровкин // Заводская лаборатория. – 1961. – Т. 27, № 5. – С. 578 – 581.

80. Измеритель теплопроводности ИТ-λ-400 : техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Актюбинск: завод «Эталон», 1979. – 40 с.

81. Буравой, С. Е. О теплофизических измерениях в монотонном режиме / С. Е. Буравой, В. В. Курепин, Е. С. Платунов // ИФЖ. – 1971. – Т. 21, № 4. – С. 750 – 760.

82. Платунов, Е. С. Метод скоростного измерения температуропроводности теплоизоляционных и полупроводниковых материалов в широком интервале температур / Е. С. Платунов // Известия вузов. Сер. Приборостроение. – 1961. – Т. 4, № 1. – С. 84 – 93.

83. Платунов, Е. С. Методы скоростных измерений теплопроводности и теплоёмкости материалов в широком интервале температур / Е. С. Платунов // Известия вузов. Сер. Приборостроение. – 1961. – Т. 4, № 4. – С. 90 – 97.

84. Шорин, С. Н. Теплопередача / С. Н. Шорин. – Москва : Высшая школа, 1964. – 490 с.

85. Багинский, А. В. Об исследовании теплопроводности полупрозрачных веществ в тонких слоях. II. Высокочастотная плоская тепловая

волна. / А. В. Багинский // Известия Сибирского отделения АН СССР. Серия технических наук. – 1981. – Вып. 3. – № 13. – С. 17 – 20.

86. Варгафтик, Н. Б. О теплопроводности паров ртути / Н. Б. Варгафтик, Ю. К. Виноградов // Теплофизика высоких температур. – 1973. – Т. 11, № 3. – С. 523 – 526.

87. Использование метода периодического нагрева зондов для исследования теплофизических свойств жидкостей и газов / Л. П. Филиппов, С. Н. Нефедов, С. Н. Кравчун и др. // Измерительная техника. – 1980. – № 6. – С. 32 – 35.

88. Кравчун, С. Н. Исследование теплофизических свойств н-гексана в окрестности критической точки методом периодического нагрева в линейном и нелинейном режимах / С. Н. Кравчун, В. М. Абдулаева // Известия СО АН СССР. Серия технических наук. – 1989. – Вып. 3. – С. 31 – 39.

89. Измерение тепловых свойств тонких диэлектрических плёнок зондовым методом периодического нагрева. 1. Теория метода / С. Н. Кравчун, С. Т. Давитадзе, Н. С. Мизина и др. // Физика твёрдого тела. – 1997. – Т. 39, № 4. – С. 762 – 767.

90. Кравчун, С. Н. О возможности измерения теплофизических свойств жидкостей в потоках методом периодического нагрева / С. Н. Кравчун, А. С. Глеубаев // Инженерно-физический журнал. – 1984. – Т. 46, № 1. – С. 113 – 118.

91. Липаев, А. А. Теплофизические исследования в петрофизике / А. А. Липаев. – Казань : Изд-во КГУ, 1993. – 147 с.

92. Нефедов, С. Н. Методика измерения комплекса теплофизических свойств жидкостей / С. Н. Нефедов, Л. П. Филиппов // Тепло- и массообмен в химической технологии. – Казань. – 1978. – Вып. 6. – С. 10 – 13.

93. Николаев, С. А. Определение теплофизических свойств капиллярно-пористых сред в условиях массопереноса методом тепловых волн / С. А. Николаев, В. А. Чугунов, А. А. Липаев // Инженерно-физический журнал. – 1990. – Т. 59, № 2. – С. 317 – 319.

94. Поликарпов, Ю. И. Применение метода температурных волн для исследования тепловых релаксационных процессов в полимерах / Ю. И. Поликарпов // Высокомолекулярные соединения. 1987. Т. 29, № 2. – С. 424 – 426.

95. Поликарпов, Ю. И. Автоматизированная установка для измерений комплексных характеристик полимеров методом температурных волн. / Ю. И. Поликарпов, В. Г. Бурцев // Приборы и техника эксперимента. – 1988. – № 1. – С. 193 – 195.

96. Филиппов, Л. П. Регистрация температурных волн в термически нелинейных средах / Л. П. Филиппов, С. Н. Кравчун, В. М. Абдулаева // Москва : Вестник Моск. ун-та. Сер. 3. Физика. Астрономия. 1988. – Т. 29, № 1. – С. 97 – 100.

97. Филиппов, Л. П. Установка для исследования комплекса теплофизических свойств жидкостей / Л. П. Филиппов, С. Н. Нефедов // Заводская лаборатория. – 1979. – № 12. – С. 1126 – 1128.

98. Specific heat and thermal conductivity of BaTiO₃ polycrystalline thin films / S. T. Davitadze, B. A. Strukov, S. N. Kravchun et al. // Applied Physics Letters. – 2002. – Vol. 80, № 9. – P. 1631 – 1633.

99. Experimental study of heat properties of Ba_{1-x}Sr_xTiO₃ thin films on a substrate / B. A. Strukov, S. T. Davitadze, S. N. Kravchun, and other // Defects and Surface-Induced Effects in Advanced Perovskites. G. Borstel et al. (eds.) NATO Science Series. 3. High Technology. – 2000. – Vol. 77. – P. 279 – 284.

100. Ивлиев, А. Д. Метод температурных волн в теплофизических исследованиях (анализ советского и российского опыта) / А. Д. Ивлиев // Теплофизика высоких температур. – 2009. – Т. 47, № 5. – С. 771 – 792.

101. Пономарев, С. В. О выборе оптимальных условий измерения теплофизических свойств веществ методом линейного «мгновенного» источника тепла / С. В. Пономарев, И. Н. Исаева, С. Н. Мочалин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2010. – Т. 76, № 5. – С. 32 – 36.

102. Кулаков, М. В. К определению термических коэффициентов твёрдых термоизоляторов / М. В. Кулаков // Журнал технической физики. – 1952. – Т. 22, № 1. – С. 67 – 72.

103. Крылов, В. И. Справочная книга по численному интегрированию / В. И. Крылов, Л. Т. Шульгина. – Москва : Наука. – 1966. – 372 с.

104. Крылов, В. И. Приближенное вычисление интегралов / В. И. Крылов. – Москва : Наука – 1967. – 500 с.

105. Власов, В. В. О скоростном автоматическом определении коэффициента теплопроводности методом мгновенного источника тепла / В. В. Власов, Н. Н. Дорогов, В. Н. Казаков // Труды ТИХМа. – 1968. – № 2. – С. 346 – 349.

106. Власов, В. В. Скоростное автоматическое определение коэффициента температуропроводности методом мгновенного источника тепла / В. В. Власов, Н. Н. Дорогов, В. Н. Казаков // Труды Тамбовского ВНИИРТАША. – 1967. – № 1. – С. 140 – 147.

107. Диткин, В. А. Интегральные преобразования и операционные исчисления / В. А. Диткин, А. П. Прудников. – Москва : Наука, 1966. – 372 с.

108. А. С. 458753 СССР. Способ определения теплофизических свойств материалов / С. З. Сапожников, Г. М. Серых. – 1975. – Бюл. № 4.

109. Серых, Г. М. Прибор для комплексного определения теплофизических характеристик материалов / Г. М. Серых, Б. П. Колесников, В. Г. Сысоев // Промышленная теплотехника. – 1981. – Т. 3, № 1. – С. 85 – 91.

110. Власов, В. В. Метод и устройства неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов массивных тел / В. В. Власов, Ю. С. Шаталов, А. А. Чуриков и др. // Измерительная техника. – 1980. – № 6. – С. 42 – 46.

111. Неразрушающий контроль, зависящий от температуры коэффициентов тепло- и теплопроводности / В. В. Власов, Ю. С. Шаталов, А. А. Чуриков и др. // Промышленная теплотехника. – 1981. – Т. 3, № 3. – С. 43 – 52.

112. Мищенко, С. В. Метод неразрушающего контроля при исследовании температурной зависимости теплофизических характеристик массивных образцов / С. В. Мищенко, А. А. Чуриков, В. Е. Подольский // Вестник ТГТУ. – 1995. – Т. 1, № 3. – 4. – С. 246 – 254.

113. Методы и устройства неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов массивных тел / В. В. Власов, Ю. С. Шаталов, Е. Н. Зотов и др. // Измерительная техника. – 1980. – № 6. – С. 42 – 45.

114. А. с. 832433 СССР, МКИ G01N 25/18. Способ определения теплофизических свойств материалов / Г. М. Серых, Б. П. Колесников – Оpubл. в Бюл. № 19, 1981.

115. А. с. 949448 СССР, МКИ G01N 25/18. Способ определения теплофизических характеристик материалов / Б. П. Колесников, Г. М. Серых, В. Г. Сысоев. – Оpubл. в Бюл. № 29, 1983.

116. Методы неразрушающего теплофизического контроля анизотропных тел / В. В. Власов, Ю. С. Шаталов, Е. Н. Зотов и др. // Инженерно-физический журнал. – 1977. – Т. 33. № – 3. – С. 479 – 485.

117. Шаталов, Ю. С. Интегральные представления постоянных коэффициентов теплопереноса : учебное пособие/ Ю. С. Шаталов. – Уфа : Уфимский авиационный институт, 1992. – 82 с.

118. Чуриков, А. А. Выбор режимных параметров для корректного проведения неразрушающего теплофизического контроля / А. А. Чуриков, Г. В. Названцева // Новое в теплофизических свойствах : тезисы докладов III Международной теплофизической школы. – Тамбов : Изд-во ТГТУ, 1998. – С. 141 – 142.

119. Мищенко, С. В. Микропроцессорная система измерения теплофизических характеристик / С. В. Мищенко, Б. И. Герасимов, А. А. Чуриков и др. // Приборы и техника эксперимента (ПТЭ). – 1989. – № 3. – С. 227–228.

120. А. с. СССР № 1689825, МКИ G 01 N 25/18. Способ определения теплофизических характеристик материалов / С. В. Мищенко, А. М. Карпов, А. А. Чуриков и др. – 1991. – Бюл. № 41.

121. Чуриков, А. А. Выбор методов неразрушающего контроля теплофизических характеристик образцов с учётом множества состояний

функционирования измерительных устройств / А. А. Чуриков, С. В. Мищенко // ИФЖ. – 1989, Т. 57. – № 1. – С. 61 – 69.

122. Мищенко, С. В. Проектирование устройств для определения теплофизических свойств твёрдых и дисперсных материалов / С. В. Мищенко, А. А. Чуриков, Г. В. Шишкина // Вестник ТГТУ. – Т. 6, № 1. – 2000. – С. 6 – 18.

123. Микропроцессорная система измерения теплофизических характеристик / С. В. Мищенко, С. В. Пономарев, А. А. Чуриков и др. // Приборы и техника и эксперименты (ПТЭ). – 1989. – № 3. – С. 227–228.

124. Смольский, Б. М. Реодинамика и теплообмен нелинейно вязкопластичных материалов / Б. М. Смольский, З. П. Шульман, В. М. Гориславец. – Минск : Наука и техника. 1970. – 446 с.

125. Уилкинсон У. Л. Неньютоновские жидкости / У. Л. Уилкинсон. – Москва : Мир, 1964. – 216 с.

126. Кулаков, М. В. Технологические измерения и приборы для химических производств / М. В. Кулаков. – Москва : Машиностроение, 1983. – 424 с.

127. Автоматические аналитические приборы : лабораторные работы / сост. : С. В. Мищенко, С. В. Пономарев, А. Г. Дивин. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 1996. – Ч. 1. – 32 с.

128. Крутоголов, В. Д. Ротационные вискозиметры / В. Д. Крутоголов, М. В. Кулаков. – Москва : Машиностроение, 1984. – 112 с.

129. Белкин, И. М. Ротационные приборы / И. М. Белкин, Г. В. Виноградов, А. И. Леонов. – Москва : Машиностроение, 1968. – 272 с.

130. Чуриков, А. А. Методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств изделий и образцов из неоднородных твёрдых материалов : дис. ... д-ра техн. наук ; специальность 05. 11. 13. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2000. – 641 с.

131. Кулаков, М. В. Исследование тепловых свойств материалов / М. В. Кулаков // Строительная промышленность. – 1952. – № 6. – С. 26–27.

132. Каганов, М. А. К вопросу об использовании метода «мгновенного» источника тепла для определения термических характеристик теплоизоляторов / М. А. Каганов // Журнал технической физики. – 1956. – Т. 26, № 3. – С. 674 – 677.

133. Шумилов, П. П. Исследования передачи тепла при движении нефтей и других жидкостей и газов по трубам / П. П. Шумилов, В. С. Яблонский // Нефтяное хозяйство. – 1929. – Т. 16, № 5. – С. 683 – 705.

134. Балабанов, П. В. Методы и средства исследования характеристик тепло- и массопереноса регенеративных продуктов и поглотителей для систем жизнеобеспечения. Ч. 1. Методы и средства определения теплофизических характеристик : монография / П. В. Балабанов. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 96 с.

135. А. с. № 463049 СССР. Способ измерения температуропроводности жидкости / Власов В. В., Кулаков М. В., Пономарев С. В. – № 19. – 1975.

136. А. с. № 495593 СССР. Способ определения температуропроводности жидкости / Власов В. В., Кулаков М. В., Пономарев С. В., Трофимов А. В., Паньков А. К., Мищенко С. В., Пучков Н. П., Васильев В. А., Федоров Н. П., Серегина В. Г. – № 46. – 1975.

137. А. с. № 518694 СССР. Способ измерения вязкости жидкости / Власов В. В., Кулаков М. В., Пономарев С. В., Мордасов М. М. – № 23. – 1975.

138. А. с. № 560172 СССР. Способ определения теплофизических свойств движущейся жидкости / Власов В. В., Кулаков М. В., Пономарев С. В., Трофимов А. В. – № 20. – 1977.

139. А. с. № 678332 СССР. Устройство для измерения среднеинтегрального значения температуры среды / Власов В. В., Шаталов Ю. С., Трофимов А. В., Пономарев С. В., Паньков А. К., Зотов Е. Н., Чуриков А. А., Федоров Н. П. – № 29. – 1979.

140. А. с. № 1223110 СССР. Способ определения температуропроводности жидкости / Пономарев С. В., Епифанов Л. И., Шуваев Э. А., Семьянинов Ю. В. – № 13. – 1986.

141. А. с. № 1376022 СССР. Способ автоматического определения температуропроводности жидкости / Пономарев С. В., Мищенко С. В., Беляев П. С., Фролов А. П. – № 7. – 1988.

142. А. с. СССР № 1673940 СССР. Способ комплексного определения теплофизических свойств жидкости / Пономарев С. В., Перов В. Н. – № 32. – 1991.

143. А. с. № 1681217 СССР. Способ определения теплофизических характеристик жидкости / Пономарев С. В., Мищенко С. В., Герасимов Б. И., Жилкин В. М., Каржуев Г. Ш. – № 36. – 1991.

144. А. с. № 1689825 СССР. Способ определения теплофизических характеристик материалов / Мищенко С. В., Карпов А. М., Чуриков А. А., Пономарев С. В., Андреев Е. Ф. – № 41. – 1991.

145. А. с. № 1711054 СССР. Способ определения температуропроводности жидкости / Пономарев С. В., Герасимов Б. И., Перов В. Н. – № 5. – 1992.

146. А. с. № 1820309 СССР. Способ измерения теплофизических свойств жидкости / Пономарев С. В., Мищенко С. В., Дивин А. Г., Чуриков А. А. – № 21. – 1993.

147. А. с. № 1827609 СССР. Способ измерения теплопроводности жидкости / Сабсай О. Ю., Пономарев С. В., Вертоградский В. А., Кириллов В. Н., Мищенко С. В. – № 26. – 1993.

148. Пат. 2243543 Российской Федерации, G01 № 25/18. Способ комплексного определения теплофизических характеристик материалов / Мищенко С. В., Пономарев С. В., Трофимов А. В., Балабанов П. В., По-

номарева Е. С. ; заявитель и патентообладатель ТГТУ. – № 2003110027 ; заявл. 08. 04. 2003 ; опублик. 27. 12. 2005, Бюл. № 36.

149. Пат. 2436066 Российской Федерации, МПК G01 № 13/00. Способ измерения коэффициента диффузии влаги в капиллярно-пористых листовых материалах / Пономарев С. В., Мочалин С. Н., Шишкина Г. В. – № 2010130744/28 ; заявл. 21. 07. 2010 ; опублик. 10. 12. 2011, Бюл. № 34.

150. Варгафтик, Н. В. Критика данных по теплопроводности нефтепродуктов / Н. В. Варгафтик // Нефтяное хозяйство. – 1938. – № 9. – С. 33 – 38.

151. К вопросу о применении методов ламинарного режима для измерения теплофизических свойств жидкостей / В. В. Власов, М. В. Кулаков, С. В. Пономарев и др. // VI Всесоюзная конференция по теплофизическим свойствам веществ, 27–28 ноября 1978. – Минск, 1978. – С. 79 – 80.

152. Пономарев, С. В. Алгоритм оптимального проектирования первичных преобразователей для измерения температуропроводности жидкости методом ламинарного режима / С. В. Пономарев, С. В. Мищенко, П. С. Беляев // Автоматизация и роботизация в химической промышленности. – Тамбов : ТИХМ, 1986. – С. 218–219.

153. Пономарев, С. В. Анализ источников систематических и случайных погрешностей при измерении теплофизических свойств жидкостей методами ламинарного режима / С. В. Пономарев // Новейшие исследования в области теплофизических свойств. – Тамбов, 1988. – С. 110.

154. Мищенко, С. В. Выбор оптимальных режимных параметров при измерении теплофизических свойств жидкостей методами ламинарного режима / С. В. Мищенко, С. В. Пономарев // VIII Всесоюзная конференция по теплофизическим свойствам веществ. – Новосибирск, 1988. – Ч. 1. – С. 219.

155. Автоматизированная измерительная установка для исследования зависимости теплопроводности и реологических характеристик неньютоновских жидкостей от скорости сдвига / А. Г. Дивин, С. В. Мищенко, С. В. Пономарев и др. // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – № 3. – С. 163 – 172.

156. Mischenko, S. V. An Automated System for the Investigation of the Thermophysical Properties of Liquids in Shear Flow / S. V. Mischenko, S. V. Ponomarev, A. G. Divin // High Temperatures-High Pressures. – 1995. – Vol. 26, N 3. – P. 287 – 298.

157. Методика введения поправки в результаты измерения теплофизических свойств / С. В. Пономарев, А. Г. Дивин, Р. В. Романов, и др. // I научная конференция ТГТУ. – Тамбов : Изд-во ТГТУ, 1994. – С. 60–61.

158. Мищенко, С. В. Метод идентификации теплофизических свойств жидкости / С. В. Мищенко, С. В. Пономарев, А. Г. Дивин // Термодинамика и теплофизические свойства веществ : сборник научных трудов. – Москва : МЭИ, 1989. – № 206. – С. 59 – 63.

159. Мищенко, С. В. Метод, устройство и автоматизированная система научных исследований теплофизических свойств материалов / С. В. Мищенко, С. В. Пономарев, А. Г. Дивин. – Москва, 1992. – Деп. в Информприборе 17. 07. 92, № 5080.

160. Мищенко, С. В. Метод, устройство и автоматизированная система научных исследований теплофизических свойств жидкостей при сдвиговом течении / С. В. Мищенко, С. В. Пономарев, А. Г. Дивин // Приборы и системы управления. – 1992. – № 10. – С. 18–19.

161. Мищенко, С. В. Методика и автоматизированная аппаратура для исследования теплофизических свойств жидких ламинарно-текущих полимеров / С. В. Мищенко, С. В. Пономарев, А. Г. Дивин // Измерительная техника. – 1992. – № 11. – С. 37 – 39.

162. Mischenko, S. V. Method and Automated Equipment for Investigation of the Thermophysical Properties of Liquid Laminar Polymer Flows / S. V. Mischenko, S. V. Ponomarev, A. G. Divin // Measurement Techniques. – 1993. Vol. 35, N 11. – P. 1300 – 1304.

163. Метод и устройство для измерения теплофизических свойств жидкостей / С. В. Мищенко, С. В. Пономарев, А. Г. Дивин, и др. // Измерительная техника. – 1994. – № 4. – С. 37 – 41.

164. Mischenko, S. V. Laminar rate methods and devices of liquids thermophysical properties measurements / S. V. Mischenko, S. V. Ponomarev, A. G. Divin // Proceeding of the «Chisa-93». – Praga, 1993.

165. Mischenko, S. V. Application of Laminar Flow Methods and Devices for Liquids Thermophysical Properties Measurements / S. V. Mischenko, S. V. Ponomarev, A. G. Divin // The Fourth Asian Thermophysical Properties Conference. – Japan, Tokyo, September, 1995. – P. 425 – 428.

166. Mischenko, S. V. Laminar Flow Methods and Devices for Liquids Thermophysical Properties Measurements / S. V. Mischenko, S. V. Ponomarev, A. G. Divin // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 1995. – Т. 1, № 3, 4. – С. 264 – 272.

167. Мищенко, С. В. Выбор оптимальных параметров процесса экструзионного формования заготовок резиновых изделий / С. В. Мищенко, С. В. Пономарев, А. Г. Дивин и др. // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 1995. – Т. 2, № 1, 2. – С. 68 – 72.

168. Mathematical Model of Polymer Laminar Flow Temperature Field and Optimization of Extrusion Technological Process Mode Parameter / S. V. Mischenko, S. V. Ponomarev, A. G. Divin et al. // Proceeding of the 2nd European Thermal-Science and 14th National Heat Transfer Conference. – Rome, Italy, 29 – 31 May, Pisa, 1996. – P. 1155 – 1157.

169. Method and Device for Technological Liquids Thermophysical Properties Measurements / S. V. Ponomarev, S. V. Grigorieva, S. V. Mishchenko et al. // TAIES'97. – Beijing, China, 1997. – P. 659 – 662.

170. Method and Device for Measuring Liquid Thermophysical Properties / S. V. Ponomarev, S. V. Grigorieva. S. V. Mishchenko et al. // Abstracts of

the Thirteenth Symposium on Thermophysical Properties, June 22 – 27, 1997. – Boulder, Colorado, USA. – P. 430.

171. Methods of Measuring Solid, Dry, Paste Materials and Liquids Thermophysical Properties / S. V. Ponomarev, S. V. Mishchenko, S. V. Grigorieva et al. // Proceedings of the 4th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics. – Brussels, June 2 – 6, 1997.

172. Method of Measurement and a Computerized Workbench for a Reseacher on the Thermophysical Properties of Liquids / S. V. Ponomarev, S. V. Mishchenko, S. V. Grigorieva et al. // Measurement Technoques. – New-York, 1998. – P. 545 – 552.

173. Метод и измерительное устройство для исследования теплофизических характеристик жидких полимерных материалов при сдвиговом течении / С. В. Мищенко, С. В. Пономарев, А. Г. Дивин и др. // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2005. – Т. 11, № 1А. – С. 14 – 22.

174. Рудобашта, С. П. Массоперенос в системах с твёрдой фазой / С. П. Рудобашта. – Москва : Химия, 1980. – 248 с.

175. Гинзбург, А. С. Массовлагообменные характеристики пищевых продуктов / А. С. Гинзбург, И. М. Савина. – Москва : Лёгкая и пищевая промышленность, 1982. – 280 с.

176. Секанов, Ю. П. Влагометрия сельскохозяйственных материалов / Ю. П. Секанов. – Москва : Агропромиздат, 1985. – 278 с.

177. Берлинер, М. А. Измерения влажности / М. А. Берлинер. – Москва : Энергия, 1973. – 400 с.

178. Кричевский, Е. С. Теория и практика экспрессного контроля влажности твёрдых и жидких материалов / Е. С. Кричевский, В. К. Бензарь, М. В. Венедиктов и др. – Москва : Энергия, 1980. – 240 с.

179. Беляев, П. С. Исследование эффективных значений коэффициента диффузии активных растворителей в композиционных материалах на основе производных целлюлозы / П. С. Беляев, С. В. Мищенко, В. А. Гладких // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 1998. – Т. 4, № 1. – С. 6 – 18.

180. Мищенко, С. В. Разработка автоматизированной системы научных исследований и проектирования технологических процессов тепло-массопереноса / С. В. Мищенко, С. В. Пономарев // Теоретические основы химических технологий. – 1994. Т. 8, № 6. – С. 547 – 555.

181. Экспериментальное исследование и расчёт тепло- и массопереноса во влажных телах / Г. Канавче, М. Урошевич, М. Стефанович и др. // Инженерно-физический журнал. – 1994. – Т. 67, № 5–6. – С. 445 – 460.

182. 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.

183. Мочалин, С. Н. Математическая модель экспрессного метода измерения коэффициента диффузии влаги в капиллярно-пористых материалах / С. Н. Мочалин // Теплофизика в энергосбережении и управлении качеством : материалы Шестой междунар. теплофизической школы. В 2 ч. – Тамбов : Изд-во Тамбов. гос. техн. ун-та, 2007. – С. 160–161.

184. Беляев, М. П. Неразрушающий экспресс-контроль коэффициента диффузии полярных растворителей в тонких изделиях / М. П. Беляев, В. П. Беляев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2008. – Т. 14, № 1. – С. 41 – 47

185. Мочалин, С. Н. К вопросу о выборе оптимальных режимных параметров метода измерения коэффициента диффузии влаги в тонколистовых капиллярно-пористых материалах / С. Н. Мочалин, С. В. Пономарев // Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов : материалы Междунар. науч.-техн. семинара ; Федеральное агентство по образованию ; ГОУ ВПО «ВГЛТА». – Воронеж, 2010. – С. 63 – 67.

186. Мочалин, С. Н. Выбор оптимальных условий измерения характеристик влагопереноса в тонколистовых капиллярно-пористых материалах методом «мгновенного» источника влаги / С. Н. Мочалин, И. Н. Исаева, С. В. Пономарев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2010. – Т. 16, № 3. – С. 533 – 545.

187. Мочалин С. Н. Анализ источников погрешностей измерений характеристик переноса влаги в тонколистовых капиллярно-пористых материалах / С. Н. Мочалин // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2010. – № 79(30). – С. 329 – 337.

188. Мочалин, С. Н. Метод измерения коэффициента диффузии влаги в тонколистовых капиллярно-пористых материалах / С. Н. Мочалин, С. В. Пономарев // Труды ТГТУ : сб. науч. статей молодых ученых и студентов. – Тамбов, 2008. – Вып. 21. – С. 135 – 139.

189. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – 2-е изд. – Москва : Энергия, 1968. – 471 с.

190. Лыков, А. В. Теория тепло- и массопереноса / А. В. Лыков, Ю. А. Михайлов. – Москва–Ленинград : Госэнергоиздат, 1963. – 536 с.

191. Муштаев, В. И. Сушка дисперсных материалов / В. И. Муштаев, В. М. Ульянов. – Москва : Химия, 1988. – 352 с.

192. Crank, J. Diffusion in Polymers / J. Crank, G. S. Park. – London – New York : Acad. Press, 1968. – 452 p.

193. Рудобашта, С. П. Диффузия в химико-технологических процессах / С. П. Рудобашта, Э. М. Каргашов. – Москва : Химия, 1993. – 208 с.

194. Кришер, О. Научные основы техники сушки / О. Кришер ; под ред. А. С. Гинзбурга ; пер. с нем.. – Москва : Иностранная литература. 1961. – 536 с.

195. Беляев, П. С. Тепло- и массоперенос в полимерных материалах с пористой структурой. Методы и средства контроля / П. С. Беляев, С. В. Мищенко. – Москва : Машиностроение, 2000. – 284 с.

196. Лыков, А. В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах / А. В. Лыков. – Москва : ГИТТЛ, 1954. – 296 с.
197. Лыков, А. В. Теория переноса энергии и вещества / А. В. Лыков, Ю. А. Михайлов. – Минск : Изд-во АН БССР, 1959. – 330 с.
198. Циерманис, Л. Б. Термодинамические и переносные свойства капиллярно-пористых тел / Л. Б. Циерманис. – Челябинск : Южно-Уральское книжное издательство, 1970. – 202 с.
199. АСУ влажностно-тепловыми параметрами. Справочная книга / П. С. Беляев, И. Ф. Бородин, Б. И. Герасимов и др. ; под ред. И. Ф. Бородин, С. В. Мищенко. – Москва : Росагропромиздат, 1988. – 224 с.
200. Мочалин, С. Н. Измерение характеристик влагопереноса тонколистковых капиллярно-пористых материалов методом «мгновенного» источника влаги : монография / С. Н. Мочалин, С. В. Пономарев. – Москва : Изд-во «Спектр», 2010. – 100 с.
201. Гуров, А. В. Выбор оптимальных условий измерения теплофизических свойств веществ методом плоского «мгновенного» источника тепла / А. В. Гуров, Г. А. Соседов, С. В. Пономарев // Измерительная техника. – 2012. – № 10. – С. 47 – 49.
202. Пономарев, С. В. Управление качеством продукции. Инструменты и методы менеджмента качества : учебное пособие / С. В. Пономарев и др.. – Москва : РИА «Стандарты и качество», 2005. – 248 с.
203. Пономарев, С. В. Управление качеством процессов и продукции. Кн. 2 : Инструменты и методы менеджмента качества процессов в производственной, коммерческой и образовательной сферах : учебное пособие / С. В. Пономарев [и др.] ; под ред. д-ра техн. наук проф. С. В. Пономарева – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 212 с.
204. Мищенко, С. В. Использование методологии решения проблем, инструментов и методов менеджмента качества при выполнении научных исследований / С. В. Мищенко и др. // Вестник Тамбовского технического университета. – 2012. – № 1. – С. 6 – 18.
205. РМГ 29-99 Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. – Минск : ИПК Издательство стандартов, 2000. – 50 с.
206. Зайдель, А. Н. Ошибки измерения физических величин / А. Н. Зайдель. – Ленинград : Наука, 1974. – 104 с.
207. Варгафтик, Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н. Б. Варгафтик. – Москва : Наука, 1972. – 720 с.
208. Гуров, А. В. Экспериментальная установка для измерения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов методом плоского «мгновенного» источника теплоты / А. В. Гуров // Метрология. – 2013. – № 4. – С. 16 – 24.
209. История метрологии, стандартизации, сертификации и управления качеством : учебное пособие / С. В. Мищенко С. В., Пономарев,

Е. С. Пономарева и др. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. – 112 с.

210. Пономарев, С. В. Управление качеством процессов и продукции. В 3-х кн. Кн. 1 : Введение в системы менеджмента качества процессов в производственной, коммерческой и образовательной сферах : учебное пособие / С. В. Пономарев, С. В. Мищенко, Е. С. Мищенко ; под ред. д-ра техн. наук, проф. С. В. Пономарева. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 240 с.

211. Гуров, А. В. Анализ источников погрешностей измерения теплофизических свойств твёрдых теплоизоляционных материалов методом плоского «мгновенного» источника теплоты / А. В. Гуров, С. В. Пономарев // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2013. – № 1(45). – С. 273 – 282.

212. Федоренко, Р. П. Приближенное решение задач оптимального управления / Р. П. Федоренко. – Москва : Наука, 1978. – 486 с.

213. Полак, Э. Численные методы оптимизации. Единый подход / Э. Полак. – Москва : Мир, 1974. – 376 с.

214. Бутковский, А. Г. Теория оптимального управления системами с распределенными параметрами / А. Г. Бутковский. – Москва : Наука, 1965. – 476 с.

215. Сиразетдинов, Т. К. Оптимизация систем с распределенными параметрами / Т. К. Сиразетдинов. – Москва : Наука, 1977. – 480 с.

216. Рейзлин, В. И. Численные методы оптимизации / В. И. Рейзлин. – Томск : Изд-во ТПУ, 2011. – 105 с.

217. Мищенко, С. В. Выбор оптимальных режимных параметров при измерении теплофизических свойств жидкостей методами ламинарного режима / С. В. Мищенко, С. В. Пономарев // Теплофизические свойства веществ. Труды VIII Всесоюзной конференции. Часть I. – Новосибирск : Изд-во ин-та теплофизики СО АН СССР, 1989. – С. 282 – 286.

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

219. Сергеев, О. А. Метрологические основы теплофизических измерений / О. А. Сергеев. – Москва : Изд-во стандартов, 1972. – 156 с.

220. Касандрова, О. Н. Обработка результатов наблюдений / О. Н. Касандрова, В. В. Лебедев. – Москва : Наука, 1970. – 104 с.

221. Сертификат соответствия № 0438013 от 26. 11. 2010. Плиты полистирольные вспененные экструзионные «Европлекс» типа ПС-Э, ПС-Э-А. Серийный выпуск по ТУ 5767-055-00288490-2008. Код ОК 005(ОКП): 576754.

222. Сертификат соответствия № 0539937 от 03. 09. 2012. Плиты полистирольные вспененные экструзионные URSA XPS марок: URSA XPS

N-III, URSA XPS N-III-G4, URSA XPS N-V, Серийный выпуск по ТУ 5767-001-56864652-2008(с изм. № 1, 2). Код ОК 005(ОКП): 576754.

223. Сертификат соответствия № 0538367 от 26. 07. 2011. Плиты полистирольные вспененные экструзионные торговой марки «ПЕНОПЛ-ЭКС». Серийный выпуск по ТУ 5767-016-56925804-2011. Код ОК 005(ОКП): 576754.

224. ГОСТ 17622–72. Стекло органическое техническое. Технические условия. – Москва : Изд-во стандартов, 1989. – 18 с.

225. Применение метода «мгновенного» источника тепла для определения теплофизических характеристик древесины / А. В. Гуров, С. В. Пономарев, Д. А. Дивина и др. // Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий (ПМТУКТ-2013) : сборник трудов VI Международной конференции. – Воронеж : ИПЦ ВГУ, 2013. – С. 84 – 86.

226. Гуров, А. В. К вопросу о выборе оптимальных условий измерения коэффициента температуропроводности методом плоского «мгновенного» источника тепла / А. В. Гуров, С. В. Пономарев // Теплофизические исследования и измерения в энерго- и ресурсосбережении, при контроле и управлении качеством процессов, продукции и услуг : материалы Восьмой международной теплофизической школы ; Душанбе (Таджикистан), 8 – 13 окт. 2012 г. – Душанбе : Типография Ходжи Хасан, 2012. – С. 401 – 403.

227. Гуров, А. В. К вопросу о выборе оптимальных условий измерения объёмной теплоёмкости методом плоского «мгновенного» источника тепла / А. В. Гуров, А. Е. Родина, С. В. Пономарев // Теплофизические исследования и измерения в энерго- и ресурсосбережении, при контроле и управлении качеством процессов, продукции и услуг : материалы Восьмой международной теплофизической школы ; Душанбе (Таджикистан), 8 – 13 окт. 2012 г. – Душанбе : Типография Ходжи Хасан, 2012. – С. 408 – 409.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ОБЗОР МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	5
1.1. Применение методов «мгновенных» источников теплоты для измерения комплекса теплофизических свойств теплоизоляционных материалов	6
1.1.1. Использование метода линейного «мгновенного» источника теплоты для измерения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов	6
1.1.2. Использование метода плоского «мгновенного» источника теплоты для измерения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов	12
1.2. Цели и задачи дальнейших исследований	14
2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДА ПЛОСКОГО «МГНОВЕННОГО» ИСТОЧНИКА ТЕПЛОТЫ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЕГО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ	15
2.1. Возможные подходы к выбору оптимальных режимных параметров разрабатываемого метода и рациональных конструкционных размеров измерительной ячейки	15
2.2. Результаты применения теоретического подхода к выбору оптимальных условий измерения теплофизических свойств веществ методом плоского «мгновенного» источника теплоты	17
2.2.1. Физическая модель метода и устройства	17
2.2.2. Математическая модель и расчётные соотношения метода измерений	18
2.2.3. Вывод соотношений для вычисления погрешностей	22
2.2.4. Оценка погрешностей измерений, выбор оптимальных режимных параметров метода и рационального контрольного размера измерительного устройства	27
2.2.5. Порядок осуществления основных измерительных операций разработанного метода плоского «мгновенного» источника теплоты	29
2.3. Анализ источников погрешностей измерения теплофизических свойств твёрдых теплоизоляционных материалов методом плоского «мгновенного» источника теплоты	30
2.3.1. Анализ источников погрешностей, обусловленных неполным выполнением допущений, принятых при разработке математической модели используемого метода и измерительной ячейки ...	31
2.3.2. Анализ источников погрешностей, обусловленных ошибками при осуществлении метода плоского «мгновенного» источника теплоты	37
2.3.3. Анализ источников погрешностей определения искомых теплофизических свойств, обусловленных неточным измерением физических величин, входящих в расчётные формулы	39

2.4. Рекомендации по разработке методики введения поправок на систематические погрешности измерения теплофизических свойств веществ	41
2.4.1. Формы математических зависимостей, используемых при введении поправок	41
2.4.2. Рекомендации по разработке методики введения поправок на систематические погрешности измерения теплофизических свойств	42
2.4.3. Практическое применение изложенных выше рекомендаций при разработке методики введения поправок в результаты измерения теплопроводности и температуропроводности жидкостей	46
3. РАЗРАБОТКА, ИЗГОТОВЛЕНИЕ, ОТЛАДКА И ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	53
3.1. Экспериментальная установка для измерения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов методом плоского «мгновенного» источника теплоты	53
3.1.1. Состав разработанной и изготовленной экспериментальной установки	53
3.1.2. Устройство измерительной ячейки для экспериментального определения теплофизических свойств исследуемого материала	55
3.1.3. Подключение измерительной ячейки к плате сбора данных	57
3.1.4. Алгоритм функционирования ИИУС	59
3.2. Оценки погрешностей измерения теплофизических свойств твердых теплоизоляционных материалов с использованием разработанного метода плоского «мгновенного» источника теплоты и изготовленной экспериментальной установки	62
3.2.1. Основные подходы к оценке погрешностей измерения теплофизических свойств материалов	63
3.2.2. Результаты предварительной оценки погрешностей измерения искомым теплофизических свойств теплоизоляционных материалов	64
3.2.3. Результаты экспериментального оценивания погрешностей измерения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов с применением разработанного метода плоского «мгновенного» источника теплоты и изготовленного измерительного устройства	65
3.3. Разработка методики введения поправок на систематические погрешности измерения теплопроводности теплоизоляционных материалов	75
3.4. Применение метода мгновенного источника тепла для определения теплофизических характеристик древесины	77
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	79
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	80

Научное издание

ГУРОВ Андрей Викторович
ПОНОМАРЕВ Сергей Васильевич

**ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
МЕТОДОМ ПЛОСКОГО «МГНОВЕННОГО»
ИСТОЧНИКА ТЕПЛОТЫ**

Монография

Редактор Е. С. Мордасова
Инженер по компьютерному макетированию Т. Ю. Зотова

ISBN 978-5-8265-1230-2



Подписано в печать 13.06.2013.
Формат 60×84 /16. 5,81 усл. печ. л.
Тираж 450 экз. (1-й з-д 75 экз.) Заказ № 311

Издательско-полиграфический центр
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14
Тел. 8(4752) 63-81-08;
E-mail: izdatelstvo@admin.tstu.ru