

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.

Потребность в информации о теплофизических свойствах (ТФС) теплоизоляционных материалов (ТМ) возникает при проектировании новых технологических процессов, при математическом моделировании и решении задач оптимизации модернизируемых производств, а также при контроле качества продукции в условиях реально действующих производственных процессов. Основным подходом к получению знаний о ТФС новых веществ и материалов по-прежнему остается их экспериментальное измерение.

Одним из перспективных направлений в измерении ТФС ТМ является использование методов «мгновенных» источников теплоты. Традиционные методики осуществления таких методов не уделяли должного внимания вопросам выбора: 1) оптимальных условий измерений и обработки первичной информации; 2) рациональных конструкционных размеров применяемых измерительных устройств. Поэтому актуальность научно-исследовательской работы, направленной на повышение точности измерений ТФС за счет улучшения как процесса измерения и обработки экспериментальных данных, полученных с применением метода плоского «мгновенного» источника теплоты, так и конструкции измерительного устройства, не вызывает сомнений.

Цель работы заключается в повышении точности измерения ТФС ТМ за счет выбора оптимальных параметров алгоритмического и программно-технического обеспечения установки для осуществления методики плоского «мгновенного» источника теплоты.

Для достижения поставленной цели были решены задачи:

1) сформулирована математическая постановка и решена задача о выборе оптимальных параметров обработки экспериментальных данных и рациональных конструкционных размеров устройства;

2) уточнена методика осуществления метода плоского «мгновенного» источника теплоты для измерения ТФС ТМ, дополненная алгоритмическим и программным обеспечением процесса обработки экспериментальных данных;

3) сформулированы рекомендации по выбору рационального основного конструкционного размера измерительного устройства для осуществления разработанной методики;

4) выполнен анализ источников погрешностей измерений искомых ТФС ТМ и указаны пути снижения влияния этих источников на результирующие погрешности измерений с применением разработанной методики и измерительного устройства;

5) с учетом результатов решения задачи оптимизации и выполненного анализа возможных источников погрешностей разработана конст-

рукция и изготовлено измерительное устройство, подключенное к информационно-измерительной и управляющей системе (ИИУС), и отлажена работа экспериментальной установки;

6) в ходе экспериментальных измерений ТФС материалов с известными значениями этих свойств подтверждена работоспособность разработанной методики и изготовленной экспериментальной установки, разработан алгоритм введения поправок на систематические погрешности измерений;

7) с применением разработанной методики и изготовленной установки осуществлены измерения ТФС новых материалов.

Научная новизна диссертационной работы состоит в теоретико-аналитическом обосновании разработанной методики и устройства для его осуществления, а также в экспериментальном подтверждении правильности выполненных исследований. Основные элементы научной новизны содержатся в следующих результатах исследований:

1) на основе математической модели температурного поля $T(x, \tau)$ исследуемого образца получены расчетные формулы методики плоского «мгновенного» источника теплоты, позволяющие вычислять искомые ТФС по непосредственно измеряемым значениям температуры $T(x_0, \tau')$ и моментов времени τ' , соответствующих заданному значению β' безразмерного параметра $\beta = [T(x_0, \tau) - T_0] / [T_{\max} - T_0]$, где x_0 – расстояние от плоского нагревателя до первичного измерительного преобразователя температуры; T_0 – начальная температура образца в момент времени $\tau = 0$; $T_{\max} = T(x_0, \tau_{\max})$ – максимальное значение температуры, достигаемое при $x = x_0$ в процессе эксперимента в момент времени $\tau = \tau_{\max}$;

2) полученные расчетные формулы использованы при разработке математического описания зависимостей относительных погрешностей δa , δc_p измерения коэффициента температуропроводности a и объемной теплоемкости c_p от безразмерного параметра $\beta = [T(x_0, \tau) - T_0] / [T_{\max} - T_0]$ и от относительных погрешностей δx_0 , $\delta T_{\max} \equiv \delta(T_{\max} - T_0)$, δQ_n измерения размера x_0 , разности температур $[T_{\max} - T_0]$ и количества теплоты Q_n , поделившегося в единице площади нагревателя;

3) теоретически обоснован выбор оптимального значения безразмерного параметра $\beta_{\text{опт}} = 0,498 \approx 0,5$ и диапазона его допустимых значений $0,35 \leq \beta \leq 0,65$, обеспечивающих минимизацию погрешностей обработки экспериментальных данных;

4) разработана методика выбора рационального конструкционного размера x_0 используемого измерительного устройства, что обеспечивает дополнительное снижение погрешностей измерений искомых ТФС;

5) разработана методика осуществления метода плоского «мгновенного» источника теплоты, состоящая в том, что в течение заданного промежутка времени $0 < \tau < \tau_n$ подают постоянную мощность P на плоский нагреватель и с постоянным шагом Δt во времени измеряют и регистри-

руют значения температур $T_i = T(x_0, \tau_i)$ и моментов времени $\tau_i = \tau_{i-1} + \Delta\tau$, $i = 1, 2, \dots$ ($\tau_0 = 0$); путем сравнения текущего значения температуры T_i с предыдущим T_{i-1} определяют максимальное значение температуры $T_{\max} = T(x_0, \tau_{\max})$, отличающаяся тем, что образец изготавливают в виде трех пластин, между которыми размещают нагреватель и измеритель температуры, причем в целях сокращения длительности и снижения погрешностей измерений ТФС после начала снижения текущих значений температуры проверяют выполнение критерия $\beta_i = [T_i - T_0] / [T_{\max} - T_0] \leq \alpha$, где α наперед заданное значение из диапазона $0,90 \leq \alpha \leq 0,99$, а после выполнения этого критерия активную часть эксперимента прекращают; по зарегистрированным парам значений (τ_i, T_i) , $i = 1, 2, \dots, k$, где k – номер последнего шага измерений на активной стадии, определяют значение момента времени τ' , соответствующее оптимальной величине безразмерного параметра $\beta_{\text{опт}} \approx 0,5$, а искомые значения $a, \lambda, \text{ср}$ вычисляют по расчетным соотношениям.

Теоретическую и практическую значимость имеют: 1) методика применения математических методов теории погрешностей при выводе зависимостей для вычисления относительных среднеквадратичных погрешностей измерений, которую следует рекомендовать для использования при формировании функции цели задач оптимизации проектируемых методов и средств измерений; 2) разработанная конструкция измерительного устройства для осуществления предложенной методики; 3) изготовленное измерительное устройство; 4) созданное алгоритмическое и программное обеспечение как для обработки получаемых экспериментальных данных, так и для управления процессом осуществления измерительных операций при использовании разработанных методики и устройства в составе ИИУС.

Практическое применение полученных в диссертации научных результатов подтверждены актами об их использовании: 1) в учебно-методической работе ФГБОУ ВПО «Воронежский институт Государственной противопожарной службы МЧС России», 2) в научно-исследовательской работе и в учебном процессе при выполнении студентами магистратуры научно-исследовательских работ, курсовых работ и проектов на кафедре «Управление качеством и сертификация» ФГБОУ ВПО «ГГТУ», 3) в производственной работе ООО «Лигнум». Результаты диссертационной работы были использованы при выполнении научно-исследовательских работ по государственному заданию Минобрнауки на 2013 год № 7.4583.2011 «Развитие методов и средств для определения зависимости теплофизических характеристик неьютоновских жидкостей от скорости сдвига и температуры».

Методология и методы исследований. При выполнении работы использованы методы теории теплопроводности, математической статистики и теории погрешностей измерений, методы компьютерной обработки и

аппроксимации данных, рекомендации по применению методологии решения проблем при проведении научных исследований.

Положения, выносимые на защиту: 1) полученные расчетные формулы, являющиеся основой предложенной методики плоского «мгновенного» источника теплоты; 2) результаты решения задачи о выборе: а) оптимальных параметров процессов измерений и обработки данных; б) рациональных конструктивных размеров измерительного устройства; 3) результаты анализа источников погрешностей измерений и рекомендации по снижению влияния этих источников на результирующие погрешности измерений ТФС ТМ; 4) уточненная методика плоского «мгновенного» источника теплоты, положенная в основу разработанного алгоритмического и программно-технического обеспечения ИИУС для измерения ТФС ТМ.

Степень достоверности и апробация работы. Работоспособность разработанной методики и изготовленного измерительного устройства, достоверность получаемых с их помощью результатов измерений подтверждены при оценке их метрологических характеристик с использованием образцов материалов с известными ТФС.

Результаты выполненных исследований докладывались и обсуждались на научных конференциях ФГБОУ ВПО «ТГТУ» (2011), на Восьмой Международной теплофизической школе (Душанбе, 2012), на конференциях Воронежского института противопожарной службы (2012, 2013), на VI Международной конференции «Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий» (Воронеж, 2013).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в четырех статьях в журналах, рекомендованных ВАК, в трех статьях в сборниках научных трудов и материалов конференций и в монографии.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы (227 наименований) и приложений. Основная часть диссертации изложена на 147 страницах, содержит 26 рисунков и 15 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приведены актуальность темы и степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, выносимые на защиту положения, степень достоверности и апробация результатов диссертационной работы.

В **первой главе** «Обзор методов и средств для измерения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов» на основе обзора публикаций осуществлен анализ стационарных и нестационарных методов и

средств для измерения ТФС по теме диссертации. На основе этого анализа определено, что лучшим для достижения цели выполненного исследования (повышения точности измерений ТФС) следует считать метод плоского «мгновенного» источника теплоты. Традиционный вариант осуществления этого метода предполагает определение момента времени $\tau = \tau_{\max}$, соответствующего достижению максимальной разницы температур $[T(x_0, \tau_{\max}) - T_0] = (T_{\max} - T_0)$. Для этого варианта характерны большие погрешности измерения коэффициента температуропроводности a , обусловленные большими погрешностями определения значения τ_{\max} . Поэтому была определена необходимость совершенствования метода плоского «мгновенного» источника теплоты в целях снижения погрешностей определения искомых ТФС по экспериментальным данным, получаемым в процессе измерения. В последнем параграфе сформулированы цели и задачи дальнейших исследований.

Во **второй главе** «Теоретические основы разработанной методики применения метода плоского «мгновенного» источника теплоты и измерительного устройства для его осуществления» в параграфе 2.1 рассмотрены возможные подходы к выбору оптимальных параметров разрабатываемой методики и рациональных конструкционных размеров измерительной ячейки.

В параграфе 2.2 рассмотрены результаты применения теоретического подхода к выбору оптимальных условий измерения ТФС веществ с применением методики плоского «мгновенного» источника теплоты.

Физическая модель устройства для осуществления методики плоского «мгновенного» источника теплоты приведена на рис. 1.

Математическая модель температурного поля в образце исследуемого материала (состоящего из трех пластин – 3, 4, 5, между которыми размещены плоский нагреватель 1 и первичный измерительный преобразователь в виде термопары 2) имеет вид

$$c\rho \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right] + Q_n \delta(\tau) \delta(x), \quad \tau > 0, \quad -\infty < x < +\infty; \quad (1)$$

$$T(x, 0) = T_0 = 0; \quad (2)$$

$$T(-\infty, \tau) = T(+\infty, \tau) = T_0 = 0, \quad (3)$$

где $T(x, \tau)$ – температура в плоскости с координатой x в момент времени τ ; c, ρ, λ – удельная теплоемкость, плотность и теплопроводность исследуемого материала соответственно; T_0 – начальная температура материала, принимаемая за начало температурной шкалы каждого эксперимента ($T_0 = 0$); Q_n – количество теплоты, выделившееся в единице поверхности плоского нагревателя при $x = 0$ в момент времени $\tau = 0$; $\delta(\tau), \delta(x)$ – символические дельта-функции Дирака.

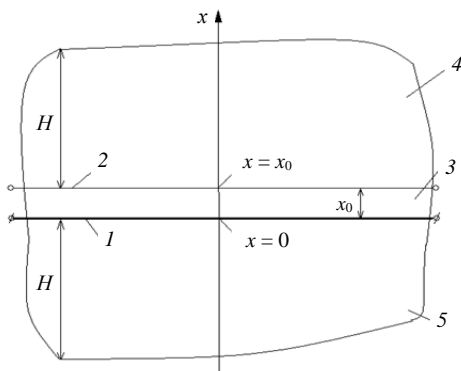


Рис. 1. Физическая модель устройства для осуществления методики плоского «мгновенного» источника теплоты:

x_0 – расстояние между плоским нагревателем 1 и первичным измерительным преобразователем температуры 2; 3, 4, 5 – составные части (в виде пластин) образца исследуемого материала

Решение краевой задачи (1) – (3) имеет вид

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

В параграфе 2.2 на основе этого решения с использованием введенного в работе безразмерного параметра

$$\beta = [T(x_0, \tau) - T_0] / (T_{\max} - T_0) \quad (4)$$

получены новые расчетные соотношения

$$a' = x_0^2 / (4z'\tau'), \quad a'' = x_0^2 / (4z''\tau''), \quad (5)$$

$$(c\rho)' = \frac{Q_n \sqrt{z'} \exp(-z')}{[T(x_0, \tau'(\beta)) - T_0] x_0 \sqrt{\pi}}, \quad (c\rho)'' = \frac{Q_n \sqrt{z''} \exp(-z'')}{[T(x_0, \tau''(\beta)) - T_0] x_0 \sqrt{\pi}}, \quad (6)$$

причем при

$$\tau = \tau_{\max}, \quad z \Big|_{\tau=\tau_{\max}} = \frac{1}{2} : c\rho = \frac{Q_n}{[T_{\max} - T_0] x_0 \sqrt{2\pi e}}, \quad (6a)$$

$$\lambda = ac\rho, \quad (7)$$

где z' и z'' – больший и меньший корни уравнения

$$\sqrt{z} \exp(-z) = \beta / \sqrt{2e}, \quad (8)$$

соответствующие моментам времени τ' и τ'' , при которых достигается (рис. 2) заданное значение безразмерного параметра β .

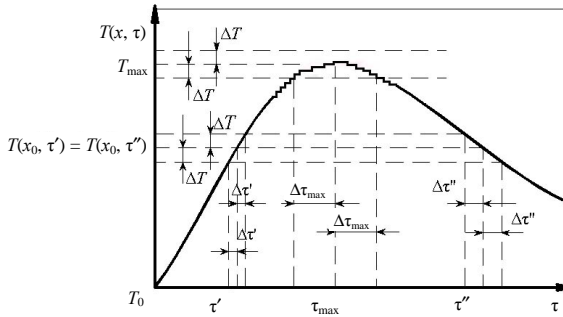


Рис. 2. График изменения во времени τ разности температур $[T(x_0, \tau) - T_0]$ в плоскости с координатой x_0 и иллюстрация непостоянства абсолютной погрешности $\Delta \tau$ определения момента времени при постоянной абсолютной погрешности ΔT измерения температуры

Из рисунка 2 видно, что определение значения момента времени τ_{\max} по графику зависимости $[T(x_0, \tau) - T_0]$ характеризуется большими погрешностями, так как эта экспериментально определяемая зависимость имеет зашумленный и размытый максимум в окрестности точки $\tau = \tau_{\max}$. Если величину максимального значения этой разности температур $T(x_0, \tau_{\max}) - T_0 = T_{\max} - T_0$ удастся измерить с достаточно малой погрешностью, то значение момента времени τ_{\max} определяется с существенно большей относительной погрешностью, достигающей 10...20%. Использование безразмерного параметра (4) позволяет от измерения значения τ_{\max} перейти к измерению моментов времени τ' и τ'' , в которые экспериментальная кривая $T(x_0, \tau) - T_0$ удовлетворяет соотношению (4), а уравнение (8) имеет корни z' и z'' . Рисунок 2 иллюстрирует тот факт, что абсолютные погрешности $\Delta \tau'$ и $\Delta \tau''$ определения моментов времени τ' и τ'' значительно меньше абсолютной погрешности $\Delta \tau_{\max}$ определения момента времени τ_{\max} .

С применением математических методов теории погрешностей на основе соотношений (5), (6) получены зависимости для вычисления относительных среднеквадратичных погрешностей измерений:

$$(\delta a)' = \sqrt{4(\delta x)^2 + \left[\frac{\delta T_{\max}}{\sqrt{2e} \sqrt{z'(\beta)} \exp(-z'(\beta)) \left(z'(\beta) - \frac{1}{2} \right)} \right]^2} + \sqrt{\left[\frac{1}{z'(\beta)} \frac{dz'(\beta)}{d\beta} \beta \right]^2 \left(1 + \frac{1}{\beta^2} \right) (\delta T_{\max})^2}; \quad (9)$$

$$(\delta a)'' = \sqrt{4(\delta x)^2 + \left[\frac{\delta T_{\max}}{\sqrt{2e} \sqrt{z''(\beta)} \exp(-z''(\beta)) \left(z''(\beta) - \frac{1}{2} \right)} \right]^2 + \left[\frac{1}{z''(\beta)} \frac{dz''(\beta)}{d\beta} \beta \right]^2 \left(1 + \frac{1}{\beta^2} \right) (\delta T_{\max})^2}; \quad (9a)$$

$$\delta(c\rho)' = \sqrt{(\delta Q_n)^2 + (\delta x)^2 + (\delta T_{\max})^2 \left[\frac{1}{\beta^2} + (1 + \beta^2) \left(\frac{dz'}{d\beta} \right)^2 \left(\frac{1}{4(z')^2} + 1 \right) \right]}; \quad (10)$$

$$\delta(c\rho)'' = \sqrt{(\delta Q_n)^2 + (\delta x)^2 + (\delta T_{\max})^2 \left[\frac{1}{\beta^2} + (1 + \beta^2) \left(\frac{dz''}{d\beta} \right)^2 \left(\frac{1}{4(z'')^2} + 1 \right) \right]}. \quad (10a)$$

По полученным формулам (9), (9a), (10), (10a) рассчитаны зависимости относительных среднеквадратичных погрешностей $\delta a'$, $\delta a''$, $\delta(c\rho)'$, $\delta(c\rho)''$ от безразмерного параметра β при различных значениях Q_n и x_0 . Оказалось, что относительная среднеквадратичная погрешность $\delta a'' > \delta a'$. Поэтому осуществлять вычисления коэффициента температуропроводности следует по моменту времени τ' , предшествующему времени τ_{\max} достижения максимального значения разности температур $T(x_0, \tau_{\max}) - T_0 = T_{\max} - T_0$.

Относительные среднеквадратичные погрешности $\delta(c\rho)'$, $\delta(c\rho)''$, не зависящие от моментов времени τ' , τ'' , принимают минимальные значения (см. рис. 3, б) при $\beta = 1$, поэтому было определено, что вычислять значения объемной теплоемкости $c\rho$ следует по формуле (ба) по значению разности температур $T_{\max} - T_0$ при $\beta = 1$.

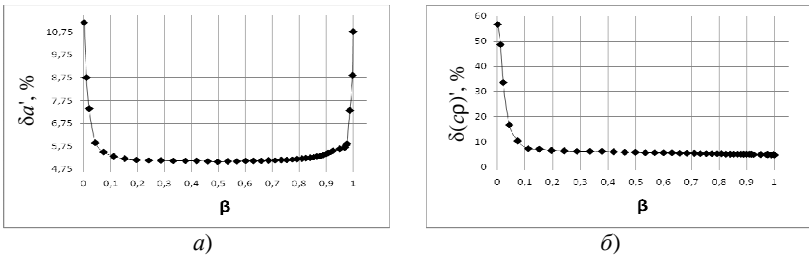


Рис. 3. Зависимости от безразмерного параметра β относительных среднеквадратичных погрешностей измерений:

a – коэффициента температуропроводности $\delta a'$ (рассчитаны по формуле (9);

б – объемной теплоемкости $\delta(c\rho)'$ (рассчитаны по формуле (10))

Из рисунка 3, а видно, что при измерении коэффициента температуропроводности значения безразмерного параметра β следует выбирать из диапазона $0,35 < \beta < 0,65$. Более точные вычисления с шагом $\Delta\beta = 0,001$ показали, что оптимальным значением параметра β является величина $\beta_{\text{опт}} = 0,498 \approx 0,5$.

Помимо выбора оптимального значения параметра $\beta = \beta_{\text{опт}} \approx 0,5$, необходимо определить величину геометрического размера x_0 , при котором погрешности δa , $\delta(\text{ср})$ принимают минимальные значения. Выполненные вычисления позволили построить линии равных уровней относительных погрешностей δa , $\delta(\text{ср})$ в плоскости с координатами β и x_0 (рис. 4).

Из рисунка 4 следует, что минимальные значения относительных среднеквадратичных погрешностей δa измерения коэффициента температуропроводности достигаются при $\beta = 0,498 \approx 0,5$ и $x_0 = 5,5$ мм, причем приемлемые погрешности измерений имеют место при $0,35 \leq \beta \leq 0,65$ и $5\text{мм} \leq x_0 \leq 6,5$ мм. Для минимизации относительных среднеквадратичных погрешностей $\delta(\text{ср})$ вычисления объемной теплоемкости ср следует осуществлять по экспериментальным данным, полученным в момент времени, когда разность температур $T(x_0, \tau) - T_0$ достигает максимальное значение $T_{\text{max}} - T_0$, т.е. при $\tau = \tau_{\text{max}}$, $\beta = 1$. Выполненные расчеты (см. рис. 4) показали, что (при $Q_n = 55000$ Вт/м², $\Delta x = 0,1$ мм, $\Delta[T_{\text{max}} - T_0] = 0,01$, $\Delta Q_n = 550$ Вт/м²) минимальная среднеквадратичная погрешность $\delta(\text{ср}) = 4,66\%$ имеет место при $\beta = 1$ и $x_0 = 5,5$ мм.

В заключительном пункте 2.2.5 сформулирован рекомендуемый порядок осуществления основных измерительных и вычислительных операций разработанной методики плоского «мгновенного» источника теплоты.

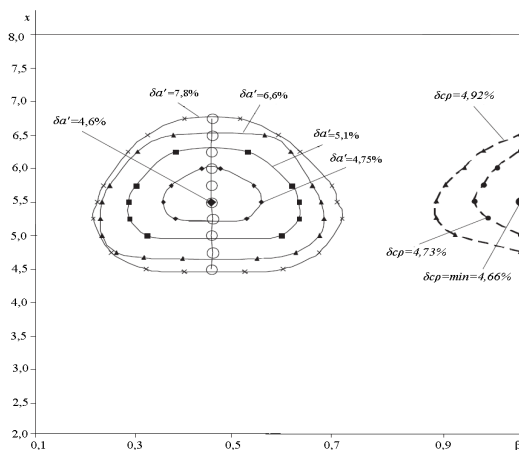


Рис. 4. Линии равных уровней относительных погрешностей δa , $\delta(\text{ср})$ измерения коэффициента температуропроводности a и объемной теплоемкости ср с применением разработанного метода

Отличительные признаки этой методики изложены в пункте 5 научной новизны на 2 и 3 страницах данного автореферата.

В параграфе 2.3 второй главы приведены результаты анализа источников погрешностей измерения ТФС ТМ методом плоского «мгновенного» источника теплоты. При этом источники погрешностей измерений были разделены на три группы: 1) обусловленные неполным выполнением допущений, принятых при разработке математической модели используемого метода и измерительной ячейки; 2) обусловленные ошибками при осуществлении разработанного метода; 3) обусловленные погрешностями прямых измерений физических величин, входящих в расчетные формулы. Выполнение рекомендаций по снижению влияния трех групп источников погрешностей позволило (уже на этапе проектирования и разработки измерительных и вычислительных операций предложенной методики и конструкции измерительной ячейки) принять меры по устранению негативного влияния этих источников погрешностей, способствовало правильному определению конструкционных размеров измерительного устройства.

В заключительном параграфе 2.4 второй главы приведены рекомендации по разработке алгоритма введения поправок на систематические погрешности измерения ТФС, являющегося одним из необходимых условий улучшения метрологических характеристик разрабатываемой в работе методики и измерительного устройства. Для введения поправок рекомендовано использовать зависимость вида

$$\varphi_{\text{исп}} = f(\varphi_{\text{изм}}, \alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots), \quad (11)$$

где $\varphi_{\text{изм}}$, $\varphi_{\text{исп}}$ – измеренное (неисправленный результат измерения) и исправленное (после введения поправки) значения физической величины соответственно; $f(\varphi_{\text{изм}}, \alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots)$ – функция, часто задаваемая в виде полиномов:

$$\varphi_{\text{исп}} = \alpha_0 + \alpha_1 \varphi_{\text{изм}}; \quad (11a)$$

$$\varphi_{\text{исп}} = \alpha_0 + \alpha_1 \varphi_{\text{изм}} + \alpha_2 (\varphi_{\text{изм}})^2; \quad (11b)$$

$$\varphi_{\text{исп}} = \alpha_0 + \alpha_1 \varphi_{\text{изм}} + \alpha_2 (\varphi_{\text{изм}})^2 + \alpha_3 (\varphi_{\text{изм}})^3, \quad (11c)$$

позволяющих по измеренному (неисправленному) значению $\varphi_{\text{изм}}$ и параметрам $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots$ вычислить исправленное (после введения поправки) значение $\varphi_{\text{исп}}$ физической величины. Предложенный порядок разработки алгоритма введения поправок наглядно представлен в параграфе 2.4 в виде поточной диаграммы.

В третьей главе «Разработка, изготовление, отладка и практическое использование экспериментальной установки для измерения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов» в параграфе 3.1 приведены сведения об устройстве и работе изготовленной экспериментальной установки, представляющей собой ИИУС, блок-схема которой приведена на рис. 5.

Экспериментальная установка (см. рис. 5) включает в себя: ИЯ – измерительную ячейку, внутри которой монтируют три составные части образца

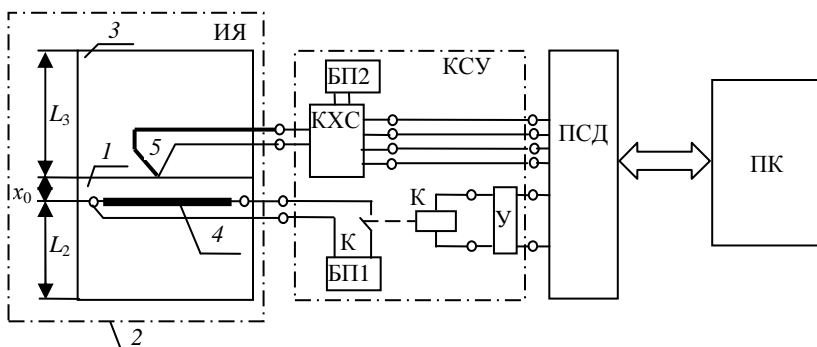


Рис. 5. Основные составные части экспериментальной установки, включенной в состав ИИУС

в виде центральной 1, нижней 2 и верхней 3 пластин, изготовленных из исследуемого материала, между которыми размещают плоский нагреватель 4 и термопару 5; ПСД – плату сбора данных, управляемую программой, созданной в среде LabVIEW и используемую для измерения и регистрации в персональном компьютере ПК первичной информации, поступающей с термопары 5, а также для включения и отключения питания нагревателя 4; КСУ – комплект согласующих устройств (включает в себя коробку холодных спаев КХС со встроенным интегральным датчиком температуры, усилитель У, промежуточное реле К и блоки питания БП1, БП2), обеспечивающих взаимное согласование входных и выходных сигналов ИЯ и ПСД; ПК – персональный компьютер, используемый: 1) для управления ходом эксперимента; 2) для измерения и регистрации первичной информации; 3) для обработки первичных экспериментальных данных и вычисления искомых значений ТФС исследуемого материала; 4) для последующего хранения как первичной измерительной информации, так и результатов ее обработки в базе данных.

Устройство измерительной ячейки, разработанной с учетом результатов анализа источников погрешностей измерений, рассмотрено в пункте 3.1.2, а в пункте 3.1.3 параграфа 3.1 приведены также схема подключения измерительной ячейки к компьютеру с использованием: 1) платы сбора данных NI USB 6211 фирмы National Instruments; 2) изготовленной коробки холодных спаев; 3) бесконтактного реле ТО707 1, управляющего работой реле К; блоков питания ИПН-2-10 и Б5-48.

В пункте 3.1.4 параграфа 3.1 рассмотрено алгоритмическое и программное обеспечение функционирования используемой в работе ИИУС, предназначенной для использования методики плоского «мгновенного» источника теплоты. Порядок осуществления этой методики и работа этого алгоритмического и программного обеспечения представлены в виде поточной диаграммы на рис. 6, причем элементы научной новизны выделены на этом рисунке пунктирными линиями.

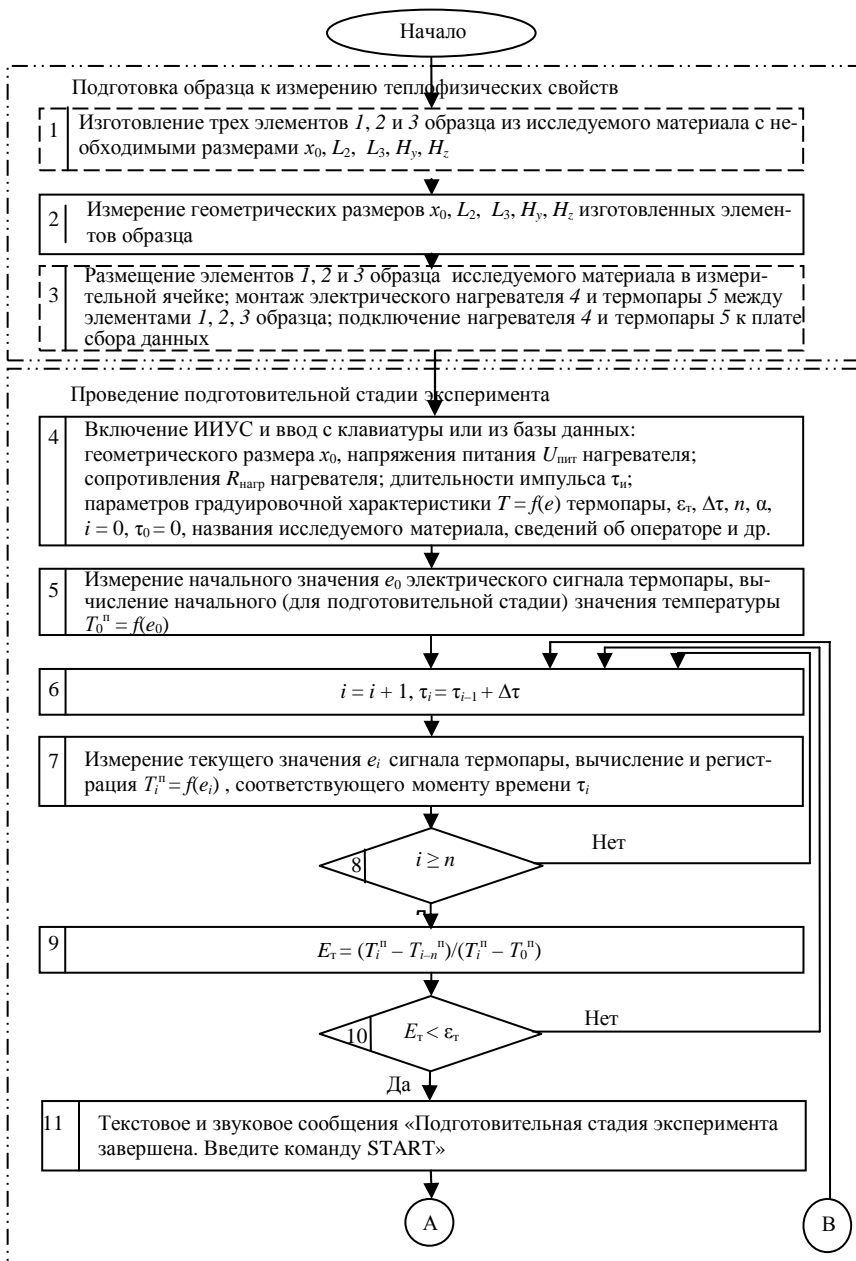


Рис. 6. Поточная диаграмма функционирования алгоритмического и программного обеспечения разработанной методики

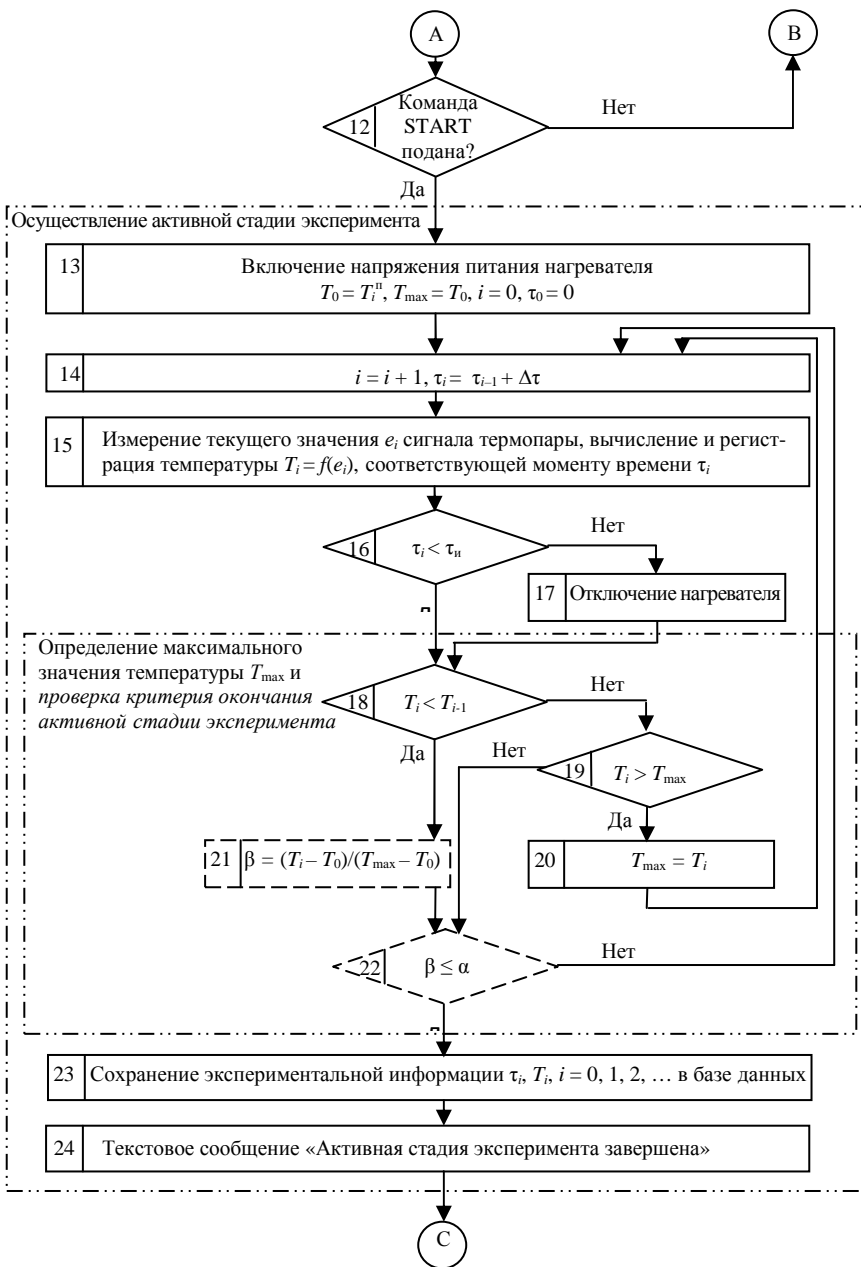


Рис. 6. Продолжение

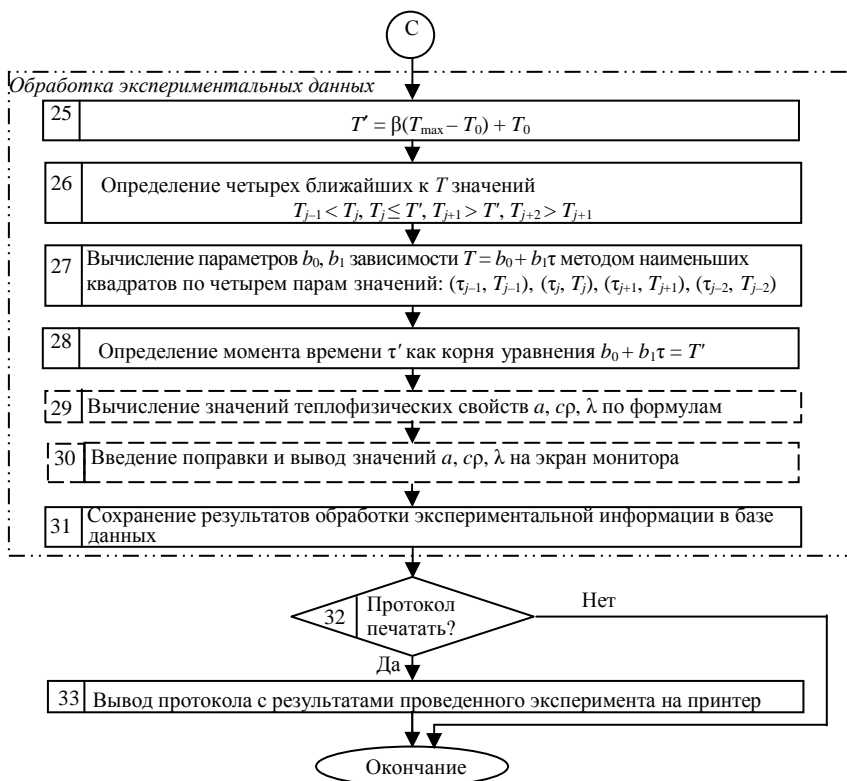


Рис. 6. Окончание

В параграфе 3.2 третьей главы, посвященной оценке погрешностей измерения ТФС твердых ТМ с использованием разработанного метода плоского «мгновенного» источника теплоты и изготовленной экспериментальной установки, рассмотрены результаты практического оценивания погрешностей измерений (на основе экспериментального подхода), полученные с использованием материалов с известными ТФС, а именно полиметилметакрилата и плит полистирольных вспененных экструзионных «Европлекс».

В параграфе 3.3 разработан алгоритм введения поправок на систематические погрешности измерения теплопроводности ТМ, базирующийся на использовании зависимости типа (11а), а именно

$$\lambda_{\text{исп}} = \alpha_0 + \alpha_1 \lambda_{\text{изм}} = 0,0024973 + 1,0015668 \lambda_{\text{изм}}. \quad (12)$$

В связи с тем, что для плит «Европлекс» нет точных данных о значениях их объемной теплоемкости sr и коэффициента температуропровод-

ности a , не удалось найти параметры α_0 и α_1 зависимости типа (12) для введения поправок на систематические погрешности измерения ϵ_r и a . В дальнейшем после появления сведений о точных значениях ϵ_r и a можно определить параметры α_0 , α_1 зависимости типа (12) для введения поправок в результаты измерения ϵ_r и a теплоизоляционных материалов.

В заключительном параграфе третьей главы приведены сведения об измеренных значениях теплопроводности $\lambda = 0,15$ Вт/(м·К) и коэффициента температуропроводности $a = 1,1 \cdot 10^{-7}$ м²/с нового материала – модифицированной древесины марки «Дестам».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе математической модели температурного поля $T(x, \tau)$ в образце ТМ, в плоскости $x = 0$ которого действовал «мгновенный» источник теплоты, получены расчетные формулы для вычисления ТФС по непосредственно измеряемым физическим величинам τ , $T(x_0, \tau)$, x_0 , Q_n и контролируемому параметру $\beta = [T(x_0, \tau) - T_0]/(T_{\max} - T_0)$.

2. С использованием полученных математических зависимостей среднеквадратичных относительных погрешностей $\delta\lambda$, $\delta(\epsilon_r)$ – как от погрешностей δx_0 , δT_{\max} , δQ_n измерения расстояния x_0 , разности температур $T_{\max} - T_0$, количества теплоты Q_n , выделившегося в единице площади нагревателя, так и от параметра β – теоретически обоснованы выбор оптимального значения параметра β и методика определения рационального конструкционного размера x_0 измерительного устройства.

3. Определена последовательность выполнения измерительных и вычислительных операций, положенная в основу алгоритмического и программного обеспечения разработанной методики плоского «мгновенного» источника теплоты для измерения ТФС ТМ, обеспечивающая минимизацию погрешностей.

4. На основе выполненного анализа источников погрешностей измерения ТФС (с применением предложенной методики) разработана конструкция измерительного устройства.

5. Разработанный алгоритм введения поправок на систематические погрешности при измерении теплопроводности с применением новой методики позволил снизить суммарные погрешности измерений.

6. Экспериментальные оценки погрешностей измерений ТФС полиметилметакрилата и плит полистирольных вспененных экструзионных «Европлэкс» подтвердили работоспособность разработанных методики плоского «мгновенного» источника теплоты и измерительного устройства, что свидетельствует о достижении цели и достоверности результатов выполненной диссертационной работы.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. 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.
2. 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.
3. Рекомендации по разработке методики введения поправок на систематические погрешности измерения теплофизических свойств веществ / С. В. Пономарев, А. Г. Дивин, П. В. Балабанов, А. В. Гуров и др. // Метрология. – 2013. – № 10. – С. 38 – 47.
4. Гуров, А. В. Анализ источников погрешностей измерения теплофизических свойств твердых 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.
5. Гуров, А. В. Применение метода «мгновенного» источника тепла для определения теплофизических характеристик древесины / А. В. Гуров, С. В. Пономарев, Д. А. Дивина, А. Г. Дивин // Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий (ПМТУКТ-2013) : сб. тр. VI Международной конференции. – Воронеж : ИПЦ ВГУ, 2013. – С. 84 – 86.
6. 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. 8 – 13 окт. 2012 г. Душанбе (Таджикистан) : Типография Ходжи Хасан, 2012. – С. 401 – 403.
7. Гуров, А. В. К вопросу о выборе оптимальных условий измерения объемной теплоемкости 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. 8 – 13 окт. 2012 г. Душанбе (Таджикистан) : Типография Ходжи Хасан, 2012. – С. 408–409.
8. Гуров, А. В. 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.