

НИИСФ Госстроя СССР

Рекомендации

по комплексному
определению
теплофизических
характеристик
строительных
материалов



Москва 1987

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
СТРОИТЕЛЬНОЙ ФИЗИКИ (НИИСФ)
ГОССТРОЯ СССР

РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО КОМПЛЕКСНОМУ
ОПРЕДЕЛЕНИЮ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК
СТРОИТЕЛЬНЫХ
МАТЕРИАЛОВ



МОСКВА СТРОИЗДАТ 1987

Рекомендовано к изданию решением секции № 4 научно-технического совета НИИСФ Госстроя СССР.

Рекомендации по комплексному определению теплофизических характеристик строительных материалов / НИИСФ. — М.: Стройиздат, 1987. — 30 с.

Описаны методика и измерительная аппаратура для комплексного определения теплофизических характеристик материалов импульсным методом. Изложены физические концепции метода, причины появления и способы компенсации систематических ошибок. Для обработки полученных результатов приведена программа для ЭВМ.

Для инженерно-технических работников научно-исследовательских и строительных организаций, занимающихся исследованием теплофизических свойств и долговечности строительных материалов.

Табл. 2, ил. 6.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В НИИСФ проведен комплекс теоретических и экспериментальных исследований, связанных с физическим обоснованием импульсного метода комплексного определения теплофизических характеристик строительных материалов, выявлением систематических ошибок измерений, их оценкой и уравниванием. Метод позволяет применять стандартную измерительную аппаратуру в совокупности с несложной дополнительной оснасткой. Для обработки получаемого массива экспериментальных данных на ЭВМ разработана программа NNK1, составленная на языке Фортран-IV, а также для работы в режиме диалога с ЭВМ на языке Бейсик-II.

Рекомендации предназначены для экспрессного определения тепловой активности, температуропроводности, теплопроводности и объемной теплоемкости строительных материалов на образцах или изделиях без их разрушения и при одностороннем доступе.

Рекомендации разработаны в лаборатории долговечности ограждающих конструкций НИИСФ канд. техн. наук Ю. Д. Ясиным и инж. Н. Н. Кузнецовой и содержат конкретные указания по использованию методики и аппаратуры.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. К основным теплофизическим характеристикам материалов, определяемым импульсным методом, относятся:

$c\gamma$ — объемная теплоемкость, Дж/(м³·К);

a — коэффициент температуропроводности, м²/с;

λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

b — коэффициент тепловой активности, Дж/(м²·с^{1/2}·К).

Для нахождения этих характеристик достаточно определять только две любые из них, остальные рассчитывают с помощью известных уравнений связи

$$\lambda = ac\gamma; b = c\gamma \sqrt{a}.$$

1.2. Строительные материалы относятся, как правило, к влажным капиллярно-пористым материалам. Определение их теплофизических характеристик является сложной метрологической задачей, поскольку в таких материалах осуществляется взаимосвязанный перенос тепла и влаги при наличии источников (стоков) тепла, обусловленных фазовыми превращениями влаги. При определении искомых характеристик в этом случае необходимо либо расчетным путем оценивать влияние только кондуктивной составляющей потока тепла,

либо экспериментальным путем сводить к минимуму влияние конвективной составляющей и источников (стоков) тепла. Последнее практически более целесообразно, но накладывает ряд ограничений на метод определения.

1.3. Импульсные методы определения имеют неоспоримые преимущества перед другими известными методами, поскольку в пределах определенного интервала времени с момента создания теплового импульса с заданными параметрами возмущение температурного поля практически не вызывает изменения исходного влажностного состояния и, следовательно, возникновения конвективной составляющей и дополнительных источников (стоков) тепла, обусловленных фазовыми превращениями влаги.

1.4. Известные импульсные методы комплексного определения теплофизических характеристик, однако, предполагают наличие датчиков температуры либо внутри, либо на противоположной от импульсного источника стороне исследуемого образца, изделия. Эти обстоятельства существенно ограничивают возможности таких методов.

1.5. Разработанные НИИСФ способ и устройство для определения теплофизических характеристик строительных материалов¹ обладают рядом неоспоримых преимуществ. Они позволяют экспрессно и комплексно определять теплофизические характеристики твердых, в том числе влажных капиллярно-пористых строительных материалов на образцах или изделиях без их нарушения и при одностороннем доступе к ним.

2. ОСНОВЫ ИМПУЛЬСНОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

2.1. Метод основан на частном решении теплофизической задачи об изменении избыточной температуры во времени в центре плоского импульсного источника тепла центральносимметричной формы и конечных размеров, расположенного в плоскости соприкосновения

¹ А. с. № 1122956 (СССР). Способ определения теплофизических характеристик материалов конструкций / Ю. Д. Ясин, Н. Н. Кузнецова. Оpubл. в Б. И., 1984, № 41.

А. с. № 1107036 (СССР). Устройство для определения теплофизических характеристик материалов конструкций / Ю. Д. Ясин, Н. Н. Кузнецова. Оpubл. в Б. И., 1984, № 29.

двух (эталонного и исследуемого) полубесконечных тел. Это решение получено в виде

$$\Delta t(\tau) = \frac{Q/\sqrt{\pi\tau}}{b_э[1 - \exp(-4a_э\tau/R^2)]^{-1} - 1 + b_м[1 - \exp(-4a_м\tau/R^2)]^{-1} - 1}, \quad (1)$$

где $\Delta t(\tau)$ — изменяющаяся во времени избыточная температура в центре плоского импульсного источника тепла, К;

Q — количество тепла, выделенное единицей площади импульсного источника, Дж/м²;

R — радиус плоского импульсного источника, эквивалентного источнику центральносимметричной формы, м; индексы «э» и «м» относятся к эталонному и исследуемому телам соответственно.

2.2. Для значений времени, соответствующих начальному периоду развития теплового процесса, решение (1) совпадает с решением аналогичной теплофизической задачи с плоским импульсным источником бесконечных размеров

$$\Delta t(\tau) = Q/[V\sqrt{\pi\tau}(b_э + b_м)]. \quad (2)$$

2.3. Практически выражения (1) и (2) равны, если невязка в значениях избыточных температур, рассчитанных по ним, не превышает предельной абсолютной погрешности измерения температуры Δt , величина которой определяется по паспортным данным измерительного прибора. В предельном случае при $\tau = \tau_{кр}$ это может быть представлено следующим образом:

$$|\Delta t| = Q/\sqrt{\pi\tau_{кр}} \left\{ \left[\frac{b_э}{1 - \exp(-4a_э\tau_{кр}/R^2)} - 1 \right] + \left[\frac{b_м}{1 - \exp(-4a_м\tau_{кр}/R^2)} - 1 \right] - (b_э + b_м) \right\}. \quad (3)$$

Таким образом, $\tau_{кр}$ — момент времени, исчисляемый с момента возникновения импульса и разграничивающий время действия рассматриваемого теплового процесса на два интервала: $\tau < \tau_{кр}$ и $\tau > \tau_{кр}$, т. е., когда этот процесс описывается выражениями (2) и (1) соответственно.

2.4. Значение $\tau_{кр}$ определяют из уравнения (3), например, методом последовательных приближений

$$\tau_{кр}^{(i)} = -\frac{R^2}{4a} / \ln \left\{ 1 - b_м / \left[\left(\frac{1}{b_э + b_м} - \Delta t \sqrt{\pi\tau_{кр}^{(i-1)}} / Q \right)^{-2} - \frac{b_э}{1 - \exp(-4a_э\tau_{кр}^{(i-1)}/R^2)} - 1 \right] \right\}, \quad (4)$$

где $i=1 \dots n$ — номер итерации; n определяется из условия $\tau_{кр}^{(n)} - \tau_{кр}^{(n-1)} = \Delta\tau$, где $\Delta\tau$ — предельная абсолютная погрешность измерения τ , которая определяется по паспортным данным измерительного устройства.

2.5. Расчетные формулы, полученные из выражений (1), (2) с учетом (4), имеют вид:

для коэффициента тепловой активности

$$b_M = Q / (\Delta t \sqrt{\pi\tau}) - b_\theta \text{ при } \tau < \tau_{кр}; \quad (5)$$

для коэффициента температуропроводности

$$a_M = -R^2 / (4\tau) / \ln \left\{ 1 - b_M / \left[Q / (\Delta t \sqrt{\pi\tau}) - \frac{b_\theta}{1 - \exp(-4a_\theta \tau / R^2) - 1} \right] \right\} \text{ при } \tau > \tau_{кр}. \quad (6)$$

В выражении (6) используют значение b_M , найденное предварительно по формуле (5).

2.6. Коэффициент теплопроводности и объемную теплоемкость с использованием уже найденных коэффициентов тепловой активности и температуропроводности определяют по формулам:

$$\lambda_M = b_M \sqrt{a_M}; \quad (7)$$

$$(c\gamma)_M = b_M / \sqrt{a_M}. \quad (8)$$

3. ОЦЕНКА СИСТЕМАТИЧЕСКИХ И СЛУЧАЙНЫХ ОТКЛОНЕНИЙ

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ

3.1. Согласно общим принципам теории ошибок измерений для косвенного метода, в котором определяемый параметр в области возможных изменений описывается непрерывно дифференцируемой функцией

$$y = f(x_1, \dots, x_n),$$

где x_1, \dots, x_n — независимые аргументы (они же измеряемые параметры), предельная абсолютная ошибка определяемого параметра может быть выражена через предельные абсолютные ошибки измеряемых параметров по формуле

$$|E_y| = \sum_{i=1}^n |(\partial y / \partial x_i) E_{x_i}|. \quad (9)$$

3.2. В общем случае предельная абсолютная ошибка может включать в себя систематическую и случайную составляющие:

$$|E_y| = |\theta_y| + |\Delta_y|, \quad |E_{x_i}| = |\theta_{x_i}| + |\Delta_{x_i}|.$$

Поскольку систематические ошибки смещают оценки измеряемых и определяемого параметров, они подлежат устранению. Для этого устанавливают физическую сущность каждой значимой систематической ошибки и, введением соответствующих поправок, исключают их влияние.

3.3. После устранения систематических ошибок выражение (9) имеет вид

$$|\Delta_y| = \sum_{i=1}^n |(\partial y / \partial x_i) \Delta_{x_i}|. \quad (10)$$

Оно используется при априорной оценке предельной абсолютной ошибки определяемого параметра в косвенном методе, при этом значения предельных абсолютных ошибок измеряемых параметров выбирают по паспортным данным соответствующих измерительных устройств.

3.4. Кроме выражения (10) для априорных оценок могут быть использованы выражения:

$$|e_y| = \sum_{i=1}^n |(\partial \ln y / \partial x_i) \Delta_{x_i}| \quad (11)$$

или

$$\sigma_y^2 = \sum_{i=1}^n |(\partial y / \partial x_i)|^2 \sigma_{x_i}^2. \quad (12)$$

Здесь $e_y = \Delta_y / y$ — предельная относительная ошибка параметра; \bar{y} — его среднее значение в определяемом диапазоне изменения; σ_{y^*} , σ_{x_i} — среднеквадратические отклонения, $\Delta = 3\sigma$.

ПРИРОДА СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ОТКЛОНЕНИЙ И ИХ УСТРАНЕНИЕ

3.5. Расчетные выражения (5), (6) получены на основе решения идеализированной математической модели. Это может быть причиной образования ряда систематических ошибок, наиболее важные из которых предопределены:

толщиной и теплофизическими свойствами плоского нагревателя; отсутствием идеального теплового контакта между плоскостями нагревателя и исследуемого материала;

фактической длительностью теплового импульса;

конечными размерами соприкасающихся тел и т. д.

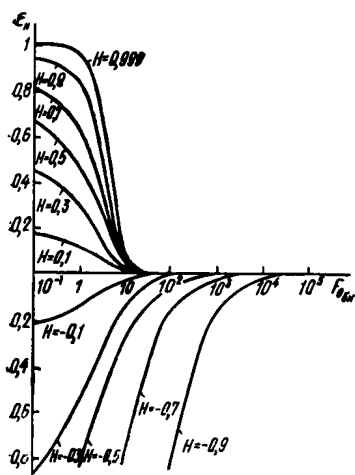


Рис. 1. Зависимость относительной ошибки ϵ_n , обусловленной влиянием толщины и теплофизических характеристик нагревателя от величин $H = (b_m - b_n)/(b_m + b_n)$, $Fo_{\delta_n} = (a_n \tau)/\delta_n^2$

Пренебрегая наличием нагревателя, т. е. полагая $b_n = b_m = b$, из выражения (13) получим

$$\Delta t = Q / (2b \sqrt{\pi \tau}). \quad (14)$$

Относительная ошибка ϵ_n , обусловленная наличием нагревателя, определяется с учетом (13) и (14) по формуле

$$\epsilon_n = (\Delta t^* - \Delta t) / \Delta t^* = 1 - (1 - H) / (1 + H) \left[1 - 2H \sum_{k=1}^{\infty} (-H)^{k-1} \times \right. \\ \left. \times \exp(-k^2 / Fo_{\delta_n}) \right]^{-1}, \quad (15)$$

где $Fo_{\delta_n} = a_n \tau / \delta_n^2$.

3.7. Графическая зависимость $\epsilon_n(H, Fo_{\delta_n})$ представленная на рис. 1, позволяет выбрать время измерения или подбирать параметры нагревателя таким образом, чтобы ошибка, обусловленная его влиянием, не превышала наперед заданной величины.

Пример. Нагреватель выполнен из фольги толщиной $2\delta_n = 2 \times 10^{-4}$ м, теплофизические характеристики которой в принятых еди-

3.6. Влияние толщины и теплофизических характеристик плоского нагревателя на значение избыточной температуры в его центре можно оценить, пользуясь известным решением симметричной относительно плоскости расположения источника тепла задачи о распространении мгновенного теплового импульса в системе, состоящей из двух полубесконечных тел и бесконечной пластины нагревателя толщиной $2\delta_n$, размещенной между ними.

$$\Delta t^* = Q / (2b_n \sqrt{\pi \tau}) \left\{ 1 - \right. \\ \left. - 2H \sum_{k=1}^{\infty} (-H)^{k-1} \exp \left[- \right. \right. \\ \left. \left. - (k^2 \sigma_n^2) / (a_n \tau) \right] \right\}, \quad (13)$$

где $H = (b_m - b_n) / (b_m + b_n)$; n — индекс принадлежности нагревателю.

ницах измерений находятся в диапазонах: $15 < \lambda < 160$; $5 \cdot 10^{-9} < a < 1 \cdot 10^{-4}$; $7 \cdot 10^9 < b < 25 \cdot 10^9$. Этим условиям удовлетворяют металлы с большим удельным сопротивлением ($\Omega\text{м}$), которые и целесообразно использовать при изготовлении нагревателей. Для такого нагревателя относительная ошибка ϵ_n , монотонно убывая, уже через 2 с после подачи импульса становится меньше $2 \cdot 10^{-2}$.

3.8. Отсутствие идеального теплового контакта, вызванное непараллельностью плоскостей нагревателя и исследуемого материала, а также наличием на его поверхности выступов и впадин, являются причиной появления систематических ошибок.

3.9. Влияние воздушных зазоров можно свести до минимума путем их заполнения консистентной смазкой с известными теплофизическими свойствами¹, наличие которой в виде дополнительного слоя учитывают используя решение

$$\Delta t^{**} = Q / \sqrt{\pi \tau} \left\{ b_0 + b_{\text{см}} \left[1 - 2H \sum_{k=1}^{\infty} (-H)^{k-1} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \exp(-k^2 / \text{Fo}_{\delta_{\text{см}}}) \right]^{-1} \right\}, \quad (16)$$

где $H = (b_m - b_{\text{см}}) / (b_m + b_{\text{см}})$, $\text{Fo}_{\delta_{\text{см}}} = (a_{\text{см}} \tau) / \delta_{\text{см}}^2$.

Относительная ошибка $\epsilon_{\text{см}}$, обусловленная наличием дополнительного слоя смазки толщиной $\delta_{\text{см}}$, с учетом (2), (15) и (16), определяется по формуле

$$\epsilon_{\text{см}} = (\Delta t^{**} - \Delta t) / \Delta t^{**} = b_m / (b_m + b_0) \left\{ 1 - (1 - H) / (1 + H) \times \right. \\ \left. \times \left[1 - 2H \sum_{k=1}^{\infty} (-H)^{k-1} \exp(-k^2 / \text{Fo}_{\delta_{\text{см}}}) \right]^{-1} \right\} = b_m / (b_m + b_0) \epsilon_n^*. \quad (17)$$

Здесь ϵ_n^* определяют по формуле (15) либо из графической зависимости, представленной на рис. 1, при этом вместо теплофизических характеристик нагревателя принимают соответствующие характеристики смазок.

3.10. Поскольку значения тепловой активности консистентных смазок (солидол, графитная и контактная смазка, унитол, литол и др.)¹ находятся в диапазоне 500—800 Дж/(м·с^{1/2}·К) и близки к значениям тепловой активности большинства строительных материалов, относительная ошибка, обусловленная наличием слоя смазки, будет, как правило, незначительна.

¹ Фройштетер Г. В., Трилиский К. К., Ишук Ю. А., Ступак П. П. Реологические и теплофизические свойства пластичных смазок. — М.: Химия, 1980.

Пример. При исследовании керамзитобетонов с коэффициентом тепловой активности $450 < b_m < 750$ ¹ с использованием в качестве заполнения воздушных прослоек солидола ($b_{см} = 559$ Дж/(м·с^{1/2}·К), согласно графической зависимости, представленной на рис. 1, для $|H| < 0,15$, (что соответствует рассматриваемому случаю) величина относительной ошибки $\varepsilon_{см}$ будет меньше $3 \cdot 10^{-2} + 5 \cdot 10^{-2}$, начиная с $Fo_{\delta_{см}} = 10$, или при толщине слоя смазки $2 \cdot 10^{-4}$ (м) и температуропроводности $a_{см} = 7 \cdot 10^{-8}$ (м²/с), начиная с момента времени $\tau = 6$ с.

3.11. Когда относительная ошибка $\varepsilon_{см}$ превышает допустимое значение, а $Fo_{\delta_{см}} < 1$ и $H > 0$, коэффициент тепловой активности материала с учетом влияния смазки рассчитывают по формуле

$$b_m = b_{см} (1 + H) / (1 - H). \quad (18)$$

Здесь значение H определяют из выражения

$$H = \{1 - b_{см} / [Q / (\Delta t \sqrt{\pi \tau}) - b_э]\} / [2 \exp(-1 / Fo_{\delta_{см}})],$$

которое получено из (16) при учете одного члена ряда.

3.12. В математической модели, лежащей в основе метода, использовалось понятие мгновенного источника тепла. Это обязывает оценить и, если необходимо, учесть влияние длительности теплового импульса на измеряемый параметр — избыточную температуру нагревателя.

3.13. С физической точки зрения воздействие импульсного источника можно представить следующим образом: в неограниченной среде в момент времени $\tau = 0$ начал действовать плоский источник тепла постоянной мощности, затем в заданный момент τ^* выделение тепла источником прекращается.

3.14. Математически это можно выразить как включение в момент времени τ^* дополнительного отрицательного источника (стока) тепла равной (по абсолютной величине) мощности.

Избыточная температура нагревателя изменяется во времени под действием источника постоянной мощности по выражению

$$\Delta t = q \sqrt{\tau} / (b \sqrt{\pi}),$$

где q — удельная мощность нагревателя, Вт/м².

То же, но с учетом воздействия отрицательного источника той же мощности, включенного в момент времени τ^* ,

$$\Delta t = q \sqrt{\tau} / (b \sqrt{\pi}) - q \sqrt{\tau - \tau^*} / (b \sqrt{\pi}) = (\Delta t)_{и.и.т.}$$

¹ Глава СНиП II-3-79*. Строительная теплотехника. — М.: Стройиздат, 1982.

Последнее выражение таким образом описывает изменение избыточной температуры плоского нагревателя под действием импульсного источника тепла с фактической длительностью импульса τ^*

3.15. Относительная ошибка обусловленная фактической длительностью импульса, определяется по формуле

$$e_{\tau^*} = [(\Delta t)_{\text{н.и.т}} - (\Delta t)_{\text{н.и.т}}] / (\Delta t)_{\text{н.и.т}},$$

где изменение избыточной температуры нагревателя под действием мгновенного источника тепла определяется выражением

$$(\Delta t)_{\text{н.и.т}} = q\tau^* / (2b \sqrt{\pi\tau}),$$

откуда следует, что для $\tau < \tau^*$ $|e_{\tau^*}| = 1$, а для $\tau > \tau^*$ ошибка определяется выражением

$$e_{\tau^*} = 1 - 2\xi_0 + 2\sqrt{\xi_0(\xi_0 - 1)}, \quad (19)$$

где $\xi_0 = \tau/\tau^*$.

Зависимость (19) графически представлена на рис. 2. С помощью последнего можно получить представление о том интервале времени, в котором предельная относительная ошибка e_{τ^*} не будет превышать заданной величины.

3.16. Используемое в методе решение для системы полубесконечных тел будет справедливо в течение некоторого времени $\tau < \tau_{\text{макс}}$ — времени сохранения условия полубесконечности исследуемого образца. Эти условия определяют, используя известное решение, описывающее распределение избыточной температуры в толще материала по нормали к плоскости нагревателя

$$\Delta t = Q_M / (b_M \sqrt{\pi\tau}) \exp[-z^2/(4a_M\tau)] \{1 - \exp[-R^2/(4a_M\tau)]\}, \quad (20)$$

где Q_M — количество тепла, выделенное единицей площади импульсного источника в тело исследуемого материала, Дж/м². Путем решения уравнения $\Delta t'(\tau) = 0$ при $z = z_M$ находят значение $\tau_{\Delta t_{\text{макс}}}$

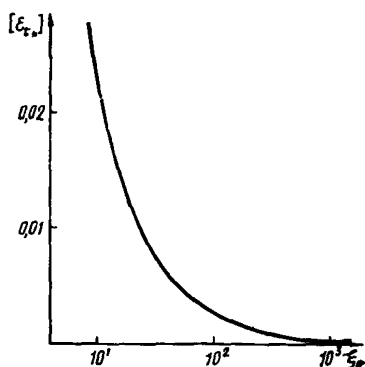


Рис. 2. Зависимость относительной ошибки $|e_{\tau^*}|$, обусловленной фактической длительностью импульса, от параметра $\xi_0 = \tau/\tau^*$

соответствующее появлению максимального значения температуры в плоскости $z=z_m$

$$\begin{aligned} \tau_{\Delta t_{\max}}^{(i+1)} &= R^2 / (4a_m) / \ln [1 + R^2 / (z_m^2 - 2a\tau_{\Delta t_{\max}}^{(i)})], \quad z_m^2 / R^2 \geq 0,25; \\ \tau_{\Delta t_{\max}}^{(i+1)} &= \{R^2 / [1 - \exp(4a_m \tau_{\Delta t_{\max}}^{(i)} / R^2)^{-1}] + z_m^2\} / (2a_m), \\ & \quad z_m^2 / R^2 < 0,25, \end{aligned} \quad (21)$$

где z_m — толщина исследуемого образца или максимальная глубина проникновения импульса.

Полагая в (20), что при $\tau = \tau_{\max} < \tau_{\Delta t_{\max}}$ в плоскости $z = z_m$ уровень полезного сигнала Δt не превышает порога чувствительности прибора Δt , получим уравнение, определяющее условия полубесконечности исследуемого образца

$$\begin{aligned} \Delta t &= Q_m / (b_m \sqrt{\pi \tau_{\max}}) \exp[-z_m^2 / (4a_m \tau_{\max})] \times \\ & \quad \times \{1 - \exp[-R^2 / (4a_m \tau_{\max})]\}, \end{aligned} \quad (22)$$

решая которое относительно неизвестного параметра, можно определить его требуемое значение.

Пример. Определить время τ_{\max} , в течение которого удовлетворится условие полубесконечности для облицовки из декоративного камня толщиной $z_m = 0,015$ м с коэффициентами тепловой активности $b_m = 1000$ Дж/(м·с^{1/2}·К) и температуропроводности $a_m = 4 \cdot 10^{-7}$ м²/с при нагревателе размером $R = 0,02$ м, выделяющем единицей площади количество тепла $Q_m = 800$ Дж/м², при ошибке измерения температуры $\Delta t = 0,01$ К. Искомая величина τ_{\max} с учетом условий задачи и расчетной формулы (22) равна 98 с (с округлением до целой секунды), что удовлетворяет условию полубесконечности, поскольку $\tau_{\Delta t_{\max}}$, вычисленное по формуле (21), равно 156 с.

СЛУЧАЙНЫЕ ОТКЛОНЕНИЯ И АПРИОРНАЯ ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ

3.17. После того, как значимые систематические ошибки выявлены, проведена их оценка и показаны возможности их уравновешивания, ошибка метода будет определяться случайной составляющей, предельное значение которой можно оценить априорно, как это показано в пп. 3.3 и 3.4.

3.18. Следуя (11), выражение для нахождения предельной относительной ошибки определения коэффициента тепловой активности исследуемого материала с учетом (5) будет иметь вид

$$|e_{b_m}| = (b_m + b_a) / b_m (|e_t| + |e_Q| + 0,5 |e_\tau|) + b_a / b_m |e_{b_a}|, \quad (23)$$

где ε_{b_M} , ε_{b_0} — предельные относительные ошибки определения коэффициентов тепловой активности исследуемого и «эталонного» материала соответственно;

ε_t , ε_τ — предельные относительные ошибки измеряемых параметров: температуры и времени соответственно.

3.19. В свою очередь предельная относительная ошибка определения коэффициента тепловой активности «эталонного» материала с учетом (5), в котором положено $b_M = b_0$, может быть найдена из выражения

$$|\varepsilon_{b_0}| = |\varepsilon_t| + |\varepsilon_Q| + 0,5 |\varepsilon_\tau|. \quad (24)$$

С учетом (24) выражение (23) преобразуется к виду

$$|\varepsilon_{b_M}| = (b_M + 2b_0)/b_M (|\varepsilon_t| + |\varepsilon_Q| + 0,5 |\varepsilon_\tau|). \quad (25)$$

3.20. Поскольку избыточная температура нагревателя изменяется во временном интервале $\tau_H < \tau < \tau_{кр}$, ее среднее значение рассчитывается по выражению

$$\Delta \bar{t} = \int_{\tau_H}^{\tau_{кр}} \Delta t(\tau) d\tau = 2Q (V_{\tau_{кр}} - V_{\tau_H}) / [V_{\pi} (b_M + b_0)(\tau_{кр} - \tau_H)],$$

тогда предельная относительная ошибка определяется по формуле

$$|\varepsilon_t| = [V_{\pi} (b_M + b_0) (V_{\tau_{кр}} + V_{\tau_H}) / (2Q)] |\Delta t|. \quad (26)$$

Формула для определения предельной относительной ошибки $|\varepsilon_\tau|$, полученная аналогичным образом, имеет вид

$$|\varepsilon_\tau| = (\ln \tau_{кр} - \ln \tau_H) / (\tau_{кр} - \tau_H). \quad (27)$$

3.21. Вводя безразмерное время $\xi_1 = \tau_{кр}/\tau_H$ в выражения (26) и (27), получим, соответственно:

для предельной относительной ошибки $|\varepsilon_t|$

$$|\varepsilon_t| = K_1 (1 + V_{\xi_1}); \quad (28)$$

для предельной относительной ошибки $|\varepsilon_\tau|$

$$|\varepsilon_\tau| = K_2 \ln \xi_1 / (\xi_1 - 1). \quad (29)$$

Здесь

$$K_1 = (b_0 + b_M) V_{\pi \tau_H} / (2Q) |\Delta t| = 0,5 |\Delta t / t(\tau_H)| = 0,5 |\varepsilon_t(\tau_H)|$$

и

$$K_2 = |\Delta \tau / \tau_H| = |\varepsilon_{\tau_H}|.$$

3.22. Исходя из характера изменения предельных относительных ошибок $|\varepsilon_t|$ и $|\varepsilon_\tau|$ (рис. 3) их суммарная ошибка $|\varepsilon_\Sigma| = |\varepsilon_t| +$

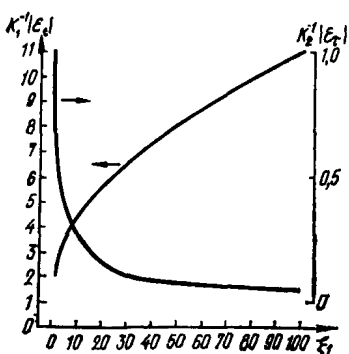


Рис. 3. Зависимость $K_1^{-1}|e_I|$ и $K_2^{-1}|e_\tau|$ от параметра $\xi_1 = \tau_{кр}/\tau_H$.

$+|e_\tau|$ будет иметь минимум, который можно определить исходя из условия $e'(\xi_1) = 0$. Учитывая последнее, будем иметь уравнение

$$K_1 / (2\sqrt{\xi_1}) + K_2 [(\xi_1 - 1) - \xi_1 \ln \xi_1] / [\xi_1 (\xi_1 - 1)^2] = 0, \quad (30)$$

решая которое относительно ξ_1 , например, итерационным методом при заданных значениях K_1 и K_2 можно определить оптимальное отношение $\tau_{кр}/\tau_H$.

3.23. Поскольку количество тепла, выделенное единицей площади импульсного источника Q , определяется из выражения

$$Q = W_H \tau^* / S_H = I^2 r_H \tau^* / S_H = IU \tau^* / S_H, \quad (31)$$

где W_H — мощность нагревателя, Вт; U — напряжение на клеммах нагревателя, В; I — сила тока, протекающего через нагреватель, А; S_H — площадь нагревателя, м²; r_H — сопротивление нагревателя, Ом, предельная относительная ошибка $|e_Q|$ в соответствии с измеряемыми параметрами определяется по формулам

$$\left. \begin{aligned} |e_Q| &= S_H^{-1} (|e_{W_H}| + |e_{\tau^*}|); \\ |e_Q| &= r_H S_H^{-1} (2|e_I| + |e_{\tau^*}|); \\ |e_Q| &= S_H^{-1} (|e_I| + |e_U| + |e_{\tau^*}|); \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

3.24. Предельная относительная ошибка определения коэффициента температуропроводности эталонного материала, согласно уравнению (1), в котором положено $b_m = b_a$, $a_m = a_a$, может быть определена по формуле

$$|e_{a_a}| = |L_a e_Q| + |L_a e_{b_a}| + |L_a e_t| + |(1 - 0,5L_a) e_\tau|, \quad (33)$$

где

$$L_a = \{1 - \exp[R^2/(4a_a \tau)]\} 4a_a \tau / R^2.$$

Предельная относительная ошибка определения коэффициента температуропроводности исследуемого материала с учетом (33) может определяться из выражения

$$\begin{aligned} |e_{a_m}| &= |L_m e_{b_m}| + |L_m (1 + 2M) e_t| + |(L_m + 1,5L_m M + \\ &+ 2ML_m/L_a - 1) e_\tau| + |L_m (1 + 2M) e_Q| + |2L_m M e_{b_a}|, \quad (34) \end{aligned}$$

где

$$L_m = F\alpha_m [1 - \exp F\alpha_m^{-1}];$$
$$M = (b_s/b_m) [1 - \exp(-F\alpha_m^{-1})] / [1 - \exp(-F\alpha_s^{-1})] \ll 1.$$

4. ПРОГРАММА ДЛЯ ЭВМ ПО ОБРАБОТКЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

4.1. Программа NNK1 предназначена для комплексного вычисления теплофизических характеристик строительных материалов (тепловой активности $\bar{b}_m |BMSR|$, температуропроводности $\bar{a}_m |AMSR|$, теплопроводности $\lambda |DLAMB|$, объемной теплоемкости $c\gamma |CGAM|$) на основе импульсного неразрушающего метода по экспериментальным данным — значениям температуры $\Delta t |T|$, измеряемой в фиксированные моменты времени $\tau |TAU|$ в центре импульсного источника тепла, расположенного в плоскости соприкосновения эталонного и исследуемого материалов.

Блок-схема программы приведена на рис. 4.

4.2. Программа снабжена соответствующими комментариями, включающими описание исходных данных (измеряемые параметры и параметры устройства) и определяемых характеристик с указанием единиц измерения.

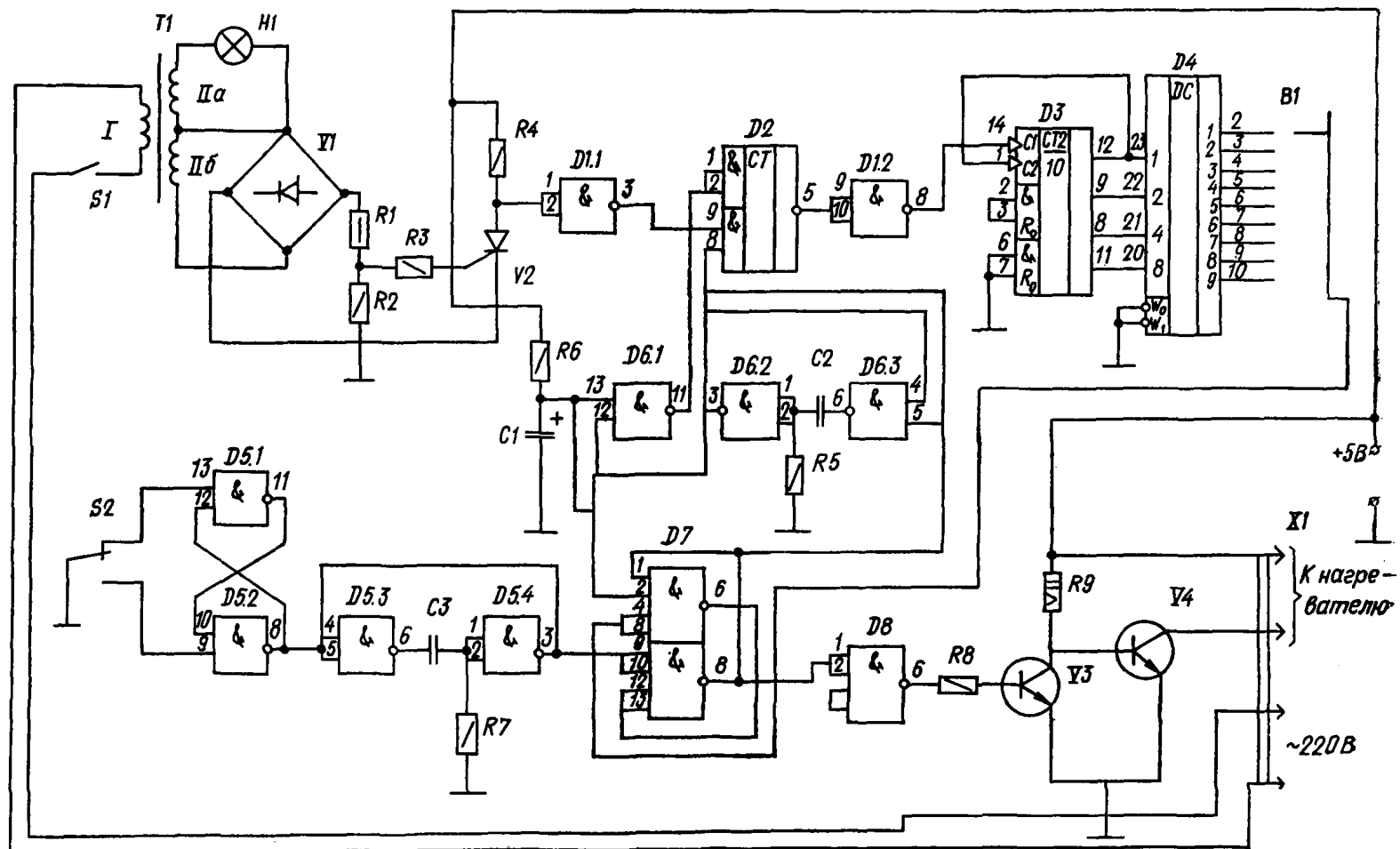
4.3. Программа работает следующим образом. После ввода исходных данных, в качестве первого приближения назначается величина $\tau_{кр}$, соответствующая 0,1 τ_{max} , начиная с τ_n , и задаются начальные средние значения \bar{b}_{m0} и \bar{a}_{m0} . Затем для фиксированных избыточных температур нагревателя и соответствующих моментов времени по формулам (5) и (6) вычисляются значения b_m , a_m и их средние \bar{b}_m , \bar{a}_m . Полученные значения сравниваются с их первым или последующими приближениями \bar{b}_{m0} и \bar{a}_{m0} и, если условия

$$|\bar{b}_{m0} - \bar{b}_m| / \bar{b}_m < 0,01 \text{ и } |\bar{a}_{m0} - \bar{a}_m| / \bar{a}_m < 0,01 \quad (35)$$

не выполняются, то происходит уточнение значений $\tau_{кр}$ по итерационной формуле (4) в цикле, выход из которого осуществляется по условию $\tau_{кр} - \tau_{кр0} < 1$, где $\tau_{кр0}$ присваивается значение предыдущего приближения $\tau_{кр}$. Таким же образом значениям \bar{b}_{m0} и \bar{a}_{m0} присваиваются значения \bar{b}_m и \bar{a}_m .

4.4. В случае выполнения условий (35), значения \bar{a}_m и \bar{b}_m выводятся на печать и вычисляются их среднеквадратические отклоне-

Электрическая принципиальная схема таймера (к прил. 2)



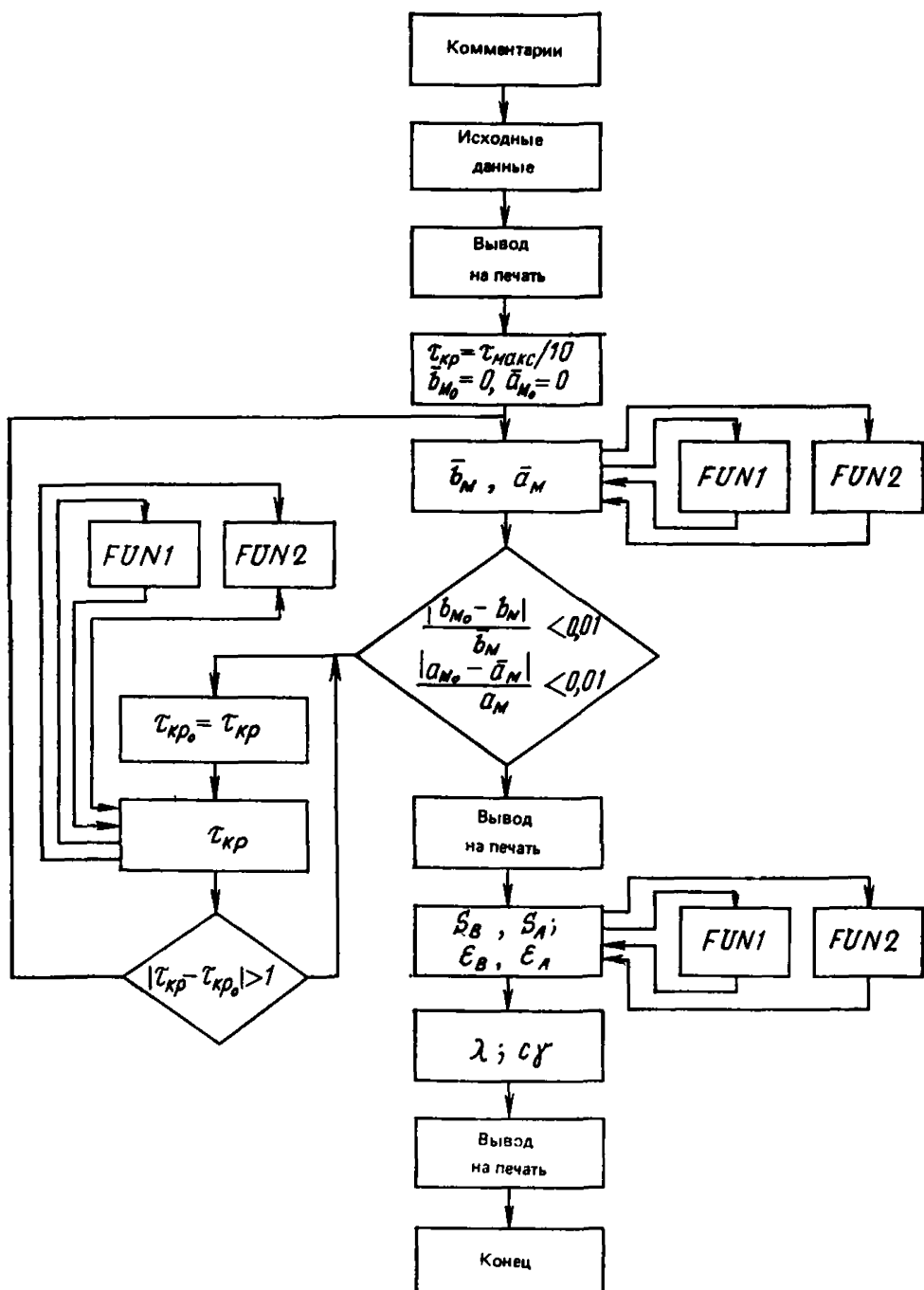


Рис. 4. Блок-схема программы NNK1

ния и относительные ошибки. Далее по формулам (7) и (8) определяются значения λ и $c\gamma$. Все вычисленные значения также выводятся на печать.

4.5. С целью более компактной записи программы использованы две подпрограммы-функции $FUN1$ и $FUN2$, реализующие общие части выражений (4), (5) и (6).

Программа $NNK1$, написанная на языке Фортран-IV, приведена в прил. 1.

5. ОБОРУДОВАНИЕ, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА, ОСНАСТКА

5.1. Для комплексного определения теплофизических характеристик необходимы: первичный преобразователь и вторичные устройства для создания теплового импульса и для измерения и регистрации изменения во времени избыточной температуры нагревателя первичного преобразователя.

5.2. Для измерения и регистрации температуры может быть использован ампервольтметр Ф30К, в комплект которого входят измерительный прибор, транскриптор и цифрочатающая электроуправляемая машина. Аналогичное устройство можно собрать из отдельных приборов, например вольтметра универсального В7-21, транскриптора Ф5033 и цифрочатающей машины ЭУМ-23Д. Возможны и другие комбинации и замены аналогичных приборов.

5.3. Устройство для создания теплового импульса состоит из стабилизированного источника питания, например Б5-21, и таймера, задающего временной интервал нагрева. В качестве таймера может быть использовано устройство, разработанное Ройфе В. С., принципиальная электрическая схема которого и перечень основных элементов к этой схеме представлены в прил. 2.

5.4. Первичный преобразователь состоит из эталонного тела (тела преобразователя), плоского нагревателя круговой или другой центральносимметричной формы и термопары, размещенной в центре нагревателя. Плоский нагреватель изготавливают из проволоки или фольги. Мощность нагревателя и его размеры, а также толщину тела первичного преобразователя выбирают исходя из представлений, изложенных выше. Для широкого круга строительных материалов характерный линейный размер плоского нагревателя можно назначить исходя из условия

$$R = 2,49 \sqrt{a_0 \tau_{кр} \ln \left| e_{\tau_{кр}}^{-1} \right|}, \quad (36)$$

где $e_{\tau_{кр}}$ — относительная ошибка измерения температуры в момент времени $\tau_{кр}$.

Пример. Определить параметры первичного преобразователя для исследования материала с априорно заданными характеристиками $a = 4 \cdot 10^{-7}$ (м²/с), $b = 1000$ Дж/(м²·с^{1/2}·К). Материалом для тела первичного преобразователя выбран полистирол со следующими

теплофизическими характеристиками: $a_0 = 3 \cdot 10^{-7}$ (м²/с), $b_0 = 200$ Дж/(м²·с^{1/2}·К). Измерение избыточной температуры в центре нагревателя производят измерительно-регистрирующим устройством, например Ф30К, с ее регистрацией через 5 с. При проведении эксперимента необходимо обеспечивать, с одной стороны — представительность экспериментального массива для статистической оценки искоемых характеристик, а с другой — минимизировать время эксперимента, что обусловлено требованием экспрессности метода, а также условиями сохранения полубесконечности исследуемого образца и тела первичного преобразователя. С этой целью выбираем количество измерений $N=30$, а $\tau_{\max}=150$ с. Поскольку значения тепловой активности определяются с большей надежностью, принимаем $\tau_{\text{кр}} = 50$, что обеспечивает десять результатов измерений $\Delta t(\tau)$ для вычисления коэффициента b_m и двадцать результатов измерений для вычисления коэффициента температуропроводности a_m . Наконец, для получения достоверных характеристик при абсолютной ошибке измерения температуры $\Delta t = 0,01$ К, потребуем, чтобы относительная ошибка e_t не превышала $1 \cdot 10^{-2}$, при $\tau = \tau_{\text{кр}}$ и $2 \cdot 10^{-2}$ при $\tau = \tau_{\max}$. Радиус нагревателя оценим по формуле (36), при этом получим $R = 2 \cdot 10^{-2}$ м. Далее, с учетом заданных значений Δt , $e_t(\tau_{\max})$, a_m , b_m , R по формуле (1) найдем значения Q , обеспечивающие соответствующие точности измерения $e_t(\tau_{\text{кр}}) < 1 \cdot 10^{-2}$ и $e_t(\tau_{\max}) < 2 \cdot 10^{-2}$: $Q_{\tau_{\text{кр}}} = 15128$ Дж/м² и $Q_{\tau_{\max}} = 15816$ Дж/м². Положим $Q = 16000$ Дж/м² и по итерационной формуле (4) уточним значение $\tau_{\text{кр}} = 56$ с. Чтобы убедиться в сохранении условий полубесконечности исследуемого образца при заданных параметрах, предварительно оценим по формуле (20) при $z=0$ и $\tau = \tau_{\max}$ Q_m — количество тепла, выделенное единицей площади нагревателя в тело материала, которое составит 13400 Дж/м², а также определим по формуле (21) $\tau_{\Delta t_{\max}}$ — время наступления максимального значения температуры в плоскости $z=0,05$ м, равное 1122 с. Затем, пользуясь выражением (22), получим время, в течение которого сохраняются условия полубесконечности образца — $\tau_{\max} = 778$ с, превышающее предполагаемое в эксперименте ($\tau_{\max} = 150$ с).

Для определения толщины эталонного тела первичного преобразователя воспользуемся уравнением (22), заменив в нем индексы материала (м) на индексы эталона (э) и приняв $Q_0 = Q - Q_m$ и определим глубину проникновения импульса в тело эталона за время $\tau_{\max} = 150$ с, которая составит $z_0 = 0,026$ м.

С целью расширения возможностей разрабатываемого первичного преобразователя выберем $z_0 = 0,05$ м, тогда в этой плоскости время наступления $\tau_{\Delta t_{\max}}$ составит 1496 с, а величина Δt_{\max} не будет превышать Δt , что обеспечит сохранение условий полубесконечности при любом τ .

6. ПОДГОТОВКА И ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА. ОБРАБОТКА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

6.1. Для определения коэффициентов тепловой активности b_m и температуропроводности a_m эталонного тела первичного преобразователя последний устанавливается на поверхности образца из того же материала, что и тело первичного преобразователя так, как это схематически показано на рис. 5. При этом плоский нагреватель с датчиком температуры и поверхность исследуемого образца должны иметь тепловой контакт.

6.2. Далее включают устройство для задания теплового импульса, который через нагреватель передается в тело первичного преобразователя и исследуемый образец. Избыточную температуру в центре нагревателя регистрируют с помощью термопары и измерительного устройства с выводом результатов на печать.

6.3. Поскольку в данном случае исследуемый образец имеет те же теплофизические характеристики ($b_m = b_0$, $a_m = a_0$), расчетные формулы, полученные из выражений (1), (2) с учетом (4), имеют вид:

для коэффициента тепловой активности

$$b_0 = Q / (2\Delta t \sqrt{\pi\tau}) \text{ при } \tau \leq \tau_{кр}; \quad (37)$$

для коэффициента температуропроводности

$$a_0 = -R^2 / [4\tau \ln(1 - 2\Delta t b_0 \sqrt{\pi\tau} / Q)] \text{ при } \tau > \tau_{кр}; \quad (38)$$

при этом в выражении (38) используют значения b_0 , найденные предварительно по формуле (37).

Остальные теплофизические характеристики λ_0 и $(c\gamma)_0$ рассчитывают по формулам (7) и (8).

6.4. Для определения теплофизических характеристик исследуемого материала (общий случай) производят испытание образца или изделия согласно пп. 6.1 и 6.2. Затем полученный массив экс-

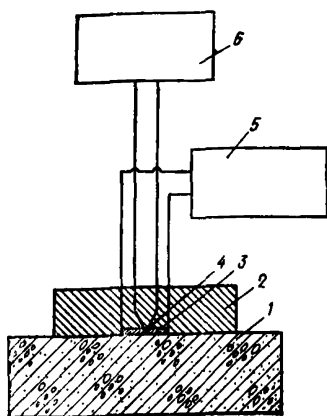


Рис. 5. Блок-схема устройства для комплексного определения теплофизических характеристик материалов образцов и изделий

периментальных данных обрабатывают на ЭВМ по программе NNK1.

6.5. Исходный массив экспериментальных данных набивают на стандартных перфокартах в следующей последовательности:

на первой карте — численное значение экспериментального массива N форматом $I3$, равное количеству измерений избыточной температуры нагревателя, проведенных с начала подачи импульса;

на второй карте — значения Q , AE , BE , DT , $DTAU$, R ;

на последующих картах — массивы значений T и TAU по семь значений на каждой карте, причем начало массива совмещают с началом новой карты. Значения на второй и последующих картах набивают форматом $E11.4$.

6.6. Результаты расчета представляются на дисплее или, в виде распечатки ЭВМ, снабжены соответствующими заголовками, обозначениями и не требуют дополнительных разъяснений.

Пример. Результаты расчета на ЭВМ.

Исходные данные			
$N = 30$			
$Q = 0.3898E\ 04$	$AE = 0.2307E-06$	$BE = 0.1372E\ 03$	
$DT = 0.5000E-02$	$DTAU = 0.1000E-01$	$R = 0.1000E-01$	
1	2	3	4
$T = 0.9500E\ 00$	$0.6700E\ 00$	$0.5400E\ 00$	$0.4600E\ 00$
$TAU = 0.5000E\ 01$	$0.1000E\ 02$	$0.1500E\ 02$	$0.2000E\ 02$
5	6	7	8
$T = 0.3900E\ 00$	$0.3500E\ 00$	$0.3100E\ 00$	$0.2700E\ 00$
$TAU = 0.2500E\ 02$	$0.3000E\ 02$	$0.3500E\ 02$	$0.4000E\ 02$
9	10	11	12
$T = 0.2400E\ 00$	$0.2200E\ 00$	$0.2000E\ 00$	$0.1900E\ 02$
$TAU = 0.4500E\ 02$	$0.5000E\ 02$	$0.5500E\ 02$	$0.6000E\ 00$
13	14	15	16
$T = 0.1700E\ 00$	$0.1600E\ 00$	$0.1500E\ 00$	$0.1400E\ 00$
$TAU = 0.6500E\ 02$	$0.7000E\ 02$	$0.7500E\ 02$	$0.8000E\ 02$
17	18	19	20
$T = 0.1300E\ 00$	$0.1200E\ 00$	$0.1100E\ 00$	$0.1000E\ 00$
$TAU = 0.8500E\ 02$	$0.9000E\ 02$	$0.9500E\ 02$	$0.1000E\ 03$
21	22	23	24
$T = 0.9000E-01$	$0.9000E-01$	$0.8000E-01$	$0.8000E-01$
$TAU = 0.1050E\ 03$	$0.1100E\ 03$	$0.1150E\ 03$	$0.1200E\ 03$
25	26	27	28
$T = 0.8000E-01$	$0.7000E-01$	$0.7000E-01$	$0.7000E-01$
$TAU = 0.1250E\ 03$	$0.1300E\ 03$	$0.1350E\ 03$	$0.1400E\ 03$
29	30		
$T = 0.7000E-01$	$0.6000E-01$		
$TAU = 0.1450E\ 03$	$0.1500E\ 03$		

Расчетные данные

AMSR = 0.3958E-06	BMSR = 0.8995E 03	SBM = 0.1913E 01
EPSBM = 0.2127E 00	SAM = 0.2425E-07	EPSAM = 0.6128E 01
DLAMB = 0.5659E 00	CGAM = 0.1430E 07	

6.7. Необходимо регулярно проводить опытную проверку метода и устройства на образцовых мерах, согласно пп. 6.1 и 6.2, расчет их теплофизических характеристик, согласно п. 6.4.

Проверку согласия между имеющимися значениями теплофизических характеристик образцовых мер и соответствующими установленными значениями осуществляют с помощью \hat{t} -критерия по формуле

$$\hat{t} = (\bar{x}_1 - \bar{x}_2) / \sqrt{S_1^2/n_1 + S_2^2/n_2} \quad (39)$$

$$\text{при } \nu = (S_1^2/n_1 + S_2^2/n_2)^2 / [(S_1^2/n_1)^2/(n_1 + 1) + (S_2^2/n_2)^2/(n_2 + 1)] - 2, \quad (40)$$

где \bar{x}_1, \bar{x}_2 — средние значения сравниваемых (известной и экспериментально определенной) теплофизических характеристик, образцовой меры соответственно; S_1^2, S_2^2 — их выборочные дисперсии; n_1, n_2 — количество измерений; ν — число степеней свободы.

Полученное значение \hat{t} сравнивают с $\hat{t}_{\text{табл}}$ при принятом уровне значимости и производят оценку согласия.

Пример. Провести опытную проверку метода и устройства, используя в качестве образцовых мер:

стекло ЛК-5 $\bar{\lambda} = 1,17$ Вт/(м·К);

оптическое стекло $\bar{\lambda} = 0,91$ Вт/(м·К);

оргстекло $\bar{\lambda} = 0,196$ Вт/(м·К);

коэффициент теплопроводности которых представлен метрологической службой. Из-за отсутствия других статистических характеристик образцовых мер положим $S_1 = 0$ и $n_1 = \infty$. Средние значения теплофизических характеристик этих материалов, экспериментально полученных предлагаемым методом на устройстве, представлены в таблице, где, кроме того, даны среднеквадратические отклонения и объем выборки.

Таблица

$\bar{\lambda}$	$S_{\bar{\lambda}}$	\bar{c}_y	$S_{\bar{c}_y}$	\bar{b}	$S_{\bar{b}}$	$\bar{a} \cdot 10^7$	$S_{\bar{a}} \cdot 10^7$
Вт/(м·К)		кДж/(м ² ·К)		кДж/(м·с ^{1/2} ·К)		м ² /с	

Стекло ЛК-5 (n=8)

1,15	0,06	1960	120	1,500	0,028	5,9	0,48
------	------	------	-----	-------	-------	-----	------

Стекло оптическое (n=6)

0,92	0,05	2200	132	1,420	0,026	4,2	0,34
------	------	------	-----	-------	-------	-----	------

Оргстекло (n=7)

0,198	0,017	1600	135	0,563	0,011	0,23	0,11
-------	-------	------	-----	-------	-------	------	------

Проверка согласия между имеющимися по данным метрологической службы значениями теплопроводности образцовых мер и соответствующими значениями, полученными по методу и на устройстве, показала, что сравниваемые значения статистически неразличимы, поскольку \hat{t} — критерий оказался меньше $\hat{t}_{\text{табл}}$ при общепринятом уровне значимости $p=0,05$.

ПРИЛОЖЕНИЕ I

Программа НКК1

С
 С КОМПЛЕКСНОЕ ВЫЧИСЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ
 С ХАРАКТЕРИСТИК СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ
 С С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМПУЛЬСНОГО
 С НЕРАЗРУШАЮЩЕГО МЕТОДА/А. С. № 1107036,
 С № 1122956/ПО ЗНАЧЕНИЯМ ТЕМПЕРАТУРЫ Т,
 С ИЗМЕРЯЕМОЙ В ФИКСИРОВАННЫЕ МОМЕНТЫ
 С ВРЕМЕНИ ТАУ В ЦЕНТРЕ НАГРЕВАТЕЛЯ,
 С РАСПОЛОЖЕННОГО В ПЛОСКОСТИ
 С СОПРИКОСНОВЕНИЯ ЭТАЛОННОГО
 С И ИССЛЕДУЕМОГО МАТЕРИАЛОВ.
 С
 С ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ
 С
 С ИЗМЕРЯЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ
 С Т—ИЗБЫТОЧНАЯ ТЕМПЕРАТУРА (ГРАД),
 С ТАУ — ВРЕМЯ (С),
 С N — КОЛИЧЕСТВО ИЗМЕРЕНИЙ,


```

C
C ПАРАМЕТРЫ УСТРОЙСТВА
C R, Q — РАДИУС (М) И МОЩНОСТЬ
C НАГРЕВАТЕЛЯ (ДЖ/(М**2)),
C АЕ, ВЕ — ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТЬ (М**2/С)
C И ТЕПЛОВАЯ АКТИВНОСТЬ (ДЖ/(М**2*SQRT(С)**
C ГРАД)) ЭТАЛОНА,
C DT, DTAU — ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ
C И ВРЕМЕНИ,
C ОПРЕДЕЛЯЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ
C АМ — ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТЬ (М**2/С),
C ВМ — ТЕПЛОВАЯ АКТИВНОСТЬ (ДЖ/(М**2 SQRT
C (С)*ГРАД)),
C DLAMB — ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ (Вт/(М*ГРАД)),
C CGAM — ОБЪЕМНАЯ ТЕПЛОЕМКОСТЬ (ДЖ/(М**2*ГРАД)),
C SAM, SBM — СРЕДНЕКВАДРАТИЧЕСКИЕ ОТКЛОНЕНИЯ
C АМ, ВМ,
C EPSAM, EPSBM — ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ ОШИБКИ
C ОПРЕДЕЛЕНИЯ АМ, ВМ.
C INTEGER N, INDEX(300)
C REAL Q, АЕ, ВЕ, DT, TAU, R,
C IT(300), TAU(300)
C READ(5,51) N
51 FORMAT(13)
WRITE(6,61) N
61 FORMAT(5X, 'ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ'/
13X, 'N=', I3)
READ(5,52) Q, АЕ, ВЕ, DT, DTAU, R
52 FORMAT(7E11.4)
WRITE(6,62) Q, АЕ, ВЕ, DT, DTAU, R
62 FORMAT(3X, 'Q=', E11.4, 1X, 'АЕ=',
E11.4, 1X, 'ВЕ=', E11.4, /
23X, 'DT=', E11.4, 1X, 'DTAU=', E11.4, 1X, 'R=', E11.4)
READ(5,52) (T(I), I=1, N)
DO 10 I=1, N
INDEX(I)=I
10 CONTINUE
DO 11 L1=1, N, 5
L2=L1+4
IF(N.LT.L2) L2=N
WRITE(6,70) (INDEX(I), I=L1, L2)
70 FORMAT(10I12)
WRITE(6,71) (T(I), I=L1, L2)

```

```

71  FORMAT(3X, 'T  =',10E12.4)
    WRITE(6,72) (TAU(I) I=II,L2)
72  FORMAT(3X, 'TAU=',10E12.4)
11  CONTINUE
    RR=-R*R/4.0
    Q=Q*O.5642
    TAUKR=TAU(N)/10.0
    BMSRO=0.0
100 AMSRO=0.0
    CONTINUE
    BMSUM=0.0
    K=0
    DO 12 I=1,N
    IF(TAU(I).GE.TAUKR) GO TO 15
    K=K+1
    BM=FUN2(T(I).Q.TAU(I))-BE
12  BMSUM=BMSUM+BM
    CONTINUE
15  CONTINUE
    AK=FLOAT(K)
    BMSR=BMSUM/AK
    AMSUM=0.0
    L=0
    K1=K+1
    DO 16 I=K1,N
    L=L+1
    AM=RR/(TAU(I)*ALOG(1.0-BMSR/(FUN2(
1T(I),Q,TAU(I))-FUN1(AE, BE, RR, TAU(I))))))
    AMSUM=AMSUM+AM
16  CONTINUE
    AL=FLOAT(L)
    AMSR=AMSUM/AL
    AI=ABS(BMSRO-BMSR)/BMSR
    A2=ABS(AMSRO-AMSR)/AMSR
    IF(A1.LE.0.01.AND.A2.LE.0.01) GO TO 101
17  CONTINUE
    TAUKRO=TAUKR
    P2=1.0/(BE+BMSR)-1.0/FUN2(DT,Q,TAUKRO))
    P1=1.0-BMSR/(P2-FUN1(AE, BE, RR, TAUKRO))
    TAUKR=RR/(AMSR ALOG(P1))
    IF(ABS(TAUKRO).GT.1.0) GO TO 17
    AMSRO=AMSR
    BMSRO=BMSR
    GO TO 100

```

```

101 CONTINUE
    WRITE(6,65) AMSR, BMSR
65  FORMAT(5X,'РАСЧЕТНЫЕ ДАННЫЕ'/
    13X,'AMSR=',E11.4,1X,'BMSR=',E11.4)
    K=0
    SB=0
    DO22 I=1,N
    IF(TAU(I).GE.TAUKR) GO TO 25
    K=K+1
    B=FUN2(T(1),Q, TOU(1))—BE—BMSR
    B=B*B
    SB=SB+B
22  CONTINUE
25  CONTINUE
    P=K—1
    X=0.0
    IF(P.EQ.O.O) GO TO 55
    OB=SQRT(SB/P)
    X=1.0
    EPSBM=OB*100.0/BMSR
55  CONTINUE
    L=0
    SA=0
    K1=K+1
    DO 26 I=K1, N
    IF(TAU(I).LE.TAUKR) GOTO 27
    L=L+1
    A=RR/(TAU(I)*ALOG(1.0—BMSR/(FUN2(T(I), Q, TAU(I))
    1—FUN1(AE, BE, RR, TAU(I)))))—AMSR
    A=A*A
    SA=SA+A
26  CONTINUE
27  CONTINUE
    P=L—1
    Y=0.0
    IF(P.EQ.O.O) GO TO 57
    OA=SQRT(SA/P)
    Y=1.0
    EPSAM=OA*100.0/AMSR
57  CONTINUE
    IF(X.EQ.O.O.OR.Y.EQ.O.O.) GO TO 85
    DLAMB=BMSR*SQRT(AMSR)

```

```
CGAM=BMSR/SQRT(AMSR)
WRITE(6,67)OB, EPSBM
67  FORMAT(3X,'SBM=',E11.4,1X,'EPSBM=',E11.4)
WRITE(6,68) OA, EPSAM
68  FORMAT(3X,'SAM=',E11.4,1X,'EPSAM=',E11.4)
WRITE(6,78) DLAMB, CGAM
78  FORMAT(3X,'DLAMB=',E11.4,1X,'CGAM=',E11.4)
85  CONTINUE
STOP
END
FUNCTION FUN1(AE, BE, RR, TAU1)
REAL AE, BE, RR, TAU1
FUN1=BE/(1.0-EXP(RR/AE/TAUI))
RETURN
END
FUNCTION FUN2(TDT, Q, TAU1)
REAL TDT, Q, TAU1
FUN2=Q/(TDT*SQRT(TAU1))
RETURN
END
```

Перечень элементов к электрической принципиальной
схеме таймера
(см. рис. на с. 16—17)

Обозначение на схеме	Элементы		
	наименование	тип	номинал
R1	Резистор	МЛТ-0,5	200 Ом
R2	»	МЛТ-0,125	100 Ом
R3	»	»	620 Ом
R4	»	»	2 кОм
R5	»	»	240 Ом
R6	»	»	1 кОм
R7	»	»	240 Ом
R8	»	»	100 Ом
R9	»	ПЭВ-7	10 Ом
C1	Конденсатор	К53-16	10 мкФ
C2	»	КЛС	0,1 мкФ
C3	»	То же	0,1 мкФ
V1	Диодная сборка	КД-9068	
V2	Тиристор	КУ10.1А	
V3	Транзистор	КТ 801Б	
V4	»	КТ 803А	
D1	Микросхема интегральная	К155ЛА3	
D2	То же	К155 ИЕ1	
D3	»	К155 ИЕ2	
D4	»	К155 ИЕ3	
D5	»	К155 ЛА3	
D6	»	К155 ЛА6	
D7	»	К155 ЛА1	
D8	»	К155 ЛА6	
T1	Трансформатор	220В/(2×98)	
X1	Разъем	2РМ-145-4И-161	
S1	Тумблер	ТВ-1	
S2	Кнопка	МАЗ	
B1	Переключатель галетный	11 положений	

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
1. Общие положения	3
2. Основы импульсного метода определения теплофизических характеристик строительных материалов	4
3. Оценка систематических и случайных отклонений	6
4. Программа для ЭВМ по обработке экспериментальных данных	15
5. Оборудование, измерительная аппаратура, оснастка	19
6. Подготовка и проведение эксперимента. Обработка полученных результатов	21
<i>Приложение 1. Программа NNK1</i>	<i>24</i>
<i>Приложение 2. Электрическая принципиальная схема таймера</i>	<i>29</i>

Нормативно-производственное издание

НИИСФ ГОССТРОЯ СССР

Рекомендации по комплексному определению теплофизических характеристик строительных материалов

Редакция инструктивно-нормативной литературы

Зав. редакцией *Л. Г. Бальян*

Редактор *С. В. Беликина*

Младший редактор *О. Я. Крачун*

Технический редактор *Г. Н. Орлова*

Корректор *Е. А. Степанова*

И/К

Сдано в набор 27.06.86. Подписано в печать 29.01.87. Т-06453. Формат 84×108¹/₃₂. Бумага тип. № 2. Гарнитура «Литературная». Печать высокая. Усл. печ. л. 1,68. Усл. кр.-отт. 1,89. Уч.-изд. л. 1,67. Тираж 9000 экз. Изд. № XII-1961. Заказ 534. Цена 10 коп.

Стройиздат, 101442, Москва, Каляевская, 23а

Владимирская типография Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли 600000, г. Владимир, Октябрьский проспект, д. 7