

6  
А-52

Министерство высшего и среднего специального образования  
Р С Ф С Р

---

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ИНЖЕНЕРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ

---

На правах рукописи

МЕЛЬНИКОВА Лидия Николаевна

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО  
ЗОНДА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ  
СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

(О1.04.14 - теплофизика)

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Ленинград  
1973



Министерство высшего и среднего специального образования  
Р С Ф С Р

---

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ИНЖЕНЕРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ

---

На правах рукописи

МЕЛЬНИКОВА Лидия Николаевна

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО  
ЗОНДА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ  
СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

(01.04.14 - теплофизика)

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Ленинград  
1 9 7 3



Работа выполнена в Ленинградском ордена Трудового Красного Знамени инженерно-строительном институте.

Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент ОБОРИН Л.А.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор - ЧУДНОВСКИЙ А.Ф.

кандидат технических наук, доцент - ДЕРЮГИН В.В.

Ведущее предприятие - ЛенЗНИИЭП.

Автореферат разослан "14" сентября 1973 г.

Защита диссертации состоится "17" октября 1973 г.

на заседании Совета по присуждению ученых степеней санитарно-технического факультета Ленинградского ордена Трудового Красного Знамени инженерно-строительного института по адресу: Ленинград, Л-5, 2-я Красноармейская, дом 4, аудитория 402 в 13 час. 00 мин.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке института.

Ученый секретарь Совета,  
к.т.н., доцент

Е.А.Прегер

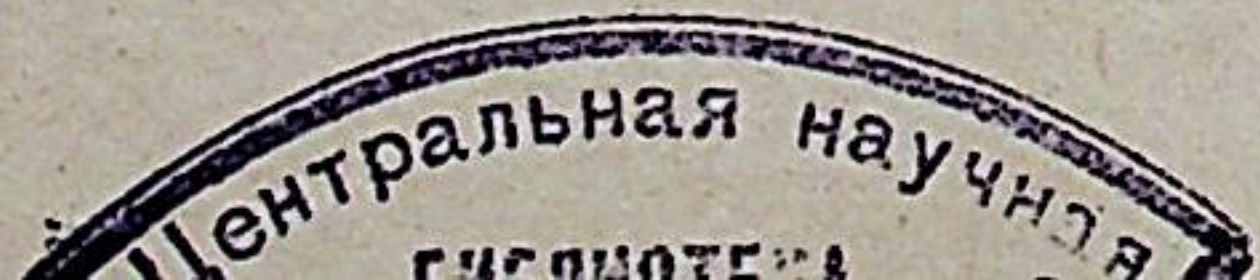
Директивами XXIV съезда КПСС предусмотрено увеличение капитальных вложений в 1971-1975 гг. на 36-40%. Осуществляется строительство большого количества промышленных и других объектов, в том числе жилых домов общей площадью 565-575 млн. кв. м.

В связи с этим существенно расширяется производство новых строительных материалов.

Теплотехнические расчеты наружных ограждений здания, различного рода печей и сушилок, оценка теплозащитных качеств строительных материалов, расчеты температурных полей и тепловых потоков невозможны без знания теплофизических характеристик материалов ( $\lambda, \alpha, \rho$ ).

Применительно к капиллярно-пористым телам, к которым относится преимущественное большинство строительных материалов, приходится говорить о так называемом эффективном коэффициенте теплопроводности, который поддается лишь грубой оценке с помощью теоретических расчетов. Поэтому в настоящее время наиболее надежным и удобным является путь экспериментального определения теплофизических характеристик строительных материалов. Экспериментальные способы определения  $\lambda, \alpha, \rho$  отличаются большим многообразием средств и методов. Объясняется это тем, что дифференциальное уравнение теплопроводности допускает в принципе бесчисленное множество решений, и каждое из них может служить основой для создания метода определения теплофизических характеристик.

Только за последние 20 лет появились сотни публикаций.





где предлагаются новые методы и конструкции приборов. Однако многие из них не имеют существенных преимуществ перед существующими, а существующие методы зачастую содержат значительные систематические погрешности. В связи с этим в настоящее время наиболее прогрессивным направлением исследований в этой области следует считать не создание новых методов определения теплофизических характеристик на основе решения дифференциального уравнения теплопроводности, а критический отбор, совершенствование и развитие известных методов. Как нам представляется, это совершенствование должно идти по пути уменьшения инструментальной погрешности, увеличения температурной чувствительности термочувствительных элементов и детального анализа степени соответствия теоретической и экспериментальной моделей.

Целью настоящей работы является исследование полупроводникового цилиндрического зонда в сочетании с мостовой схемой с большим выходным сопротивлением для измерения коэффициента теплопроводности строительных материалов и конструкций. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, приложений и содержит 130 страниц текста и 55 иллюстраций.

Первая глава посвящена обзору существующих методов определения теплофизических характеристик материалов.

Критический обзор стационарных методов, методов регулярного режима, квазистационарных методов и методов, основанных на начальной стадии развития температурного поля приводит к выводу, что наиболее удобным для строительных

материалов и конструкций является метод цилиндрического зонда постоянной мощности, в основе которого лежит принцип равномерно действующего линейного источника тепла. Этот метод обладает целым рядом преимуществ, к которым можно отнести: 1) простоту аппаратуры, 2) простоту и кратковременность эксперимента, 3) простоту математической обработки результатов измерений, 4) возможность проводить измерения в материалах и конструкциях любой формы, как в лабораторных, так и в натуральных условиях, что позволяет свести к минимуму затраты на подготовку образцов к измерению.

Не случайно конференция по современным вопросам строительной физики (Москва, 1954) приняла решение вести развитие работ и изыскание новых приборов для определения коэффициента теплопроводности по пути реализации абсолютных методов на основе принципа равномерно действующего линейного источника тепла. Общая теория метода линейного источника тепла постоянной мощности разрабатывалась как отечественными, так и зарубежными авторами. Среди них следует отметить работы А.Ф. Чудновского, Л.Ф. Янкелева, Блэквелла и др.

Существенным недостатком используемых до сих пор зондов является малая температурная чувствительность вследствие применения, как правило, в качестве термоприемника термопар или металлических сопротивлений, а следовательно, необходимость создания значительных температурных разностей на границе зонд - среда.

Применение же в качестве термочувствительного элемента



полупроводниковых терморезисторов, существенно повышающих температурную чувствительность метода, ограничивалось до сих пор нелинейными свойствами применяемых измерительных схем.

Во второй главе рассматривается полупроводниковый терморезисторный мост с большим сопротивлением измерителя  $r_{cd}$  и малым сопротивлением источника питания  $r_{ав}$ , удовлетворяющий условиям:

$$\frac{r_1 + r}{2r_1 r} r_{ав} \ll 1; \quad \frac{r_1 + r}{r_{cd}} \ll 1, \quad (I)$$

где  $r_1 = R_T$  - сопротивление полупроводникового терморезистора, включенного в рабочее плечо моста,

$r_3 = r_4 = r$  - сопротивление плеч отношения.

Показано, что при соблюдении условия (I) для выходной характеристики моста выполняется линейная зависимость

$U = f(\theta)$  при избыточных температурах терморезистора  $\theta$ , не превышающих нескольких десятков градусов. Эта зависимость удовлетворительно аппроксимируется формулой.

$$U = \pm \frac{E}{4} \frac{B}{T_0^2} \theta, \quad (2)$$

где  $E$  - ЭДС источника питания моста,  
 $B$  - постоянная терморезистора,  
 $T_0$  - температура компенсации моста.

Причем, относительная ошибка  $\delta_\theta$ , возникающая за счет линейного приближения функции  $U = f(\theta)$ , может быть оценена по формуле:

$$\delta_\theta = 1 - \frac{B}{3T_0} \text{th} \frac{3T_0}{B} \left(1 + 6 \frac{T_0^2}{B^2}\right), \quad (3)$$

т.е. определяется двумя факторами: постоянной терморезистора  $B$  и температурой равновесия моста  $T_0$ .

Показано далее, что мощность, рассеиваемая на терморезисторе, может быть выражена в виде:

$$P = \frac{E^2}{4R_0} (1 - \text{th}^2 X), \quad (4)$$

где  $R_0$  - сопротивление терморезистора при температуре компенсации моста,

$$X = \frac{B}{2T_0^2} \vartheta,$$

$\vartheta$  - избыточная температура терморезистора, обусловленная нагреванием его измерительным током.

При  $\vartheta = 0$  ( $X = 0$ ) мощность, рассеиваемая на терморезисторе, будет максимальной:

$$P_{\text{max}} = \frac{E^2}{4R_0}. \quad (5)$$

При небольших разбалаксах моста относительное изменение мощности может быть оценено по формуле:

$$\frac{dP}{d\vartheta} \frac{1}{P} = \frac{B^2 \vartheta}{4T_0^4}. \quad (6)$$

Например, для терморезистора с  $B = 3000^\circ\text{K}$  при  $T_0 = 300^\circ\text{K}$  и  $\vartheta = 5^\circ$  изменение мощности на  $1^\circ$  температуры составляет тысячные доли процента. ЭДС источника питания моста выбирается так, чтобы не превышать допустимую в данных условиях степень нагрева ПТР измерительным током.

Примем, что нагрев терморезистора измерительным током не должен превышать допустимой погрешности измерения температуры  $\delta$  ( $\vartheta \leq \delta$ ). Для терморезисторного моста



с большим сопротивлением измерителя это требование приводит к условию

$$E_{\text{доп.}} \leq \sqrt{\frac{4R_0\delta}{F}}, \quad (7)$$

где  $F$  - величина, обратная коэффициенту рассеяния.

Чувствительность терморезисторной мостовой схемы с большим сопротивлением измерения равна

$$S = \frac{dU}{d\theta} = \frac{E}{4} \frac{B}{T_0^2} \frac{1}{\left(1 \pm \frac{\theta}{T_0}\right)^2 C R^2 \frac{B}{2T_0^2} \frac{\theta}{\left(1 \pm \frac{\theta}{T_0}\right)}} \quad (8)$$

а начальная чувствительность в положении равновесия моста:

$$S_0 = \frac{E}{4} \cdot \frac{B}{T_0^2} \quad (9)$$

или

$$S_0 = \frac{B}{2T_0^2} \sqrt{\frac{R_0\delta}{F}} \quad (10)$$

Приведенный здесь и последующий анализ схем терморезисторных мостов [1] позволяет сделать следующие выводы:

Симметричный терморезисторный мост с большим сопротивлением измерителя обладает следующими свойствами:

1) линейностью функции  $U = f(\theta)$  в широком диапазоне температур,

2) наивысшей для терморезисторных мостовых схем постоянного тока чувствительностью по напряжению,

3) постоянством мощности, рассеиваемой на терморезисторе, в области избыточных температур, прилежащих к положению равновесия.

Указанные выше свойства терморезисторных мостов с большим сопротивлением измерителя дают возможность использовать терморезисторы в широкой области измерений, где до

сих пор применялись лишь термопары и металлические сопротивления.

Приведены примеры возможного использования терморезисторных мостовых схем с большим сопротивлением измерителя.

В третьей главе рассматривается конструкция полупроводникового цилиндрического зонда.

Исходные требования к конструкции зонда весьма противоречивы и сводятся к следующему:

1) выбору минимального диаметра зонда для обеспечения кратковременности эксперимента; 2) выбору минимальной возможной длины зонда при заданном диаметре, обеспечивающей допустимые искажения температурного поля за счет развития осевого потока; 3) обеспечение достаточной механической прочности оболочки зонда и устойчивость к коррозии; 4) обеспечение достаточно высокой теплопроводности оболочки зонда, отвечающей условиям решения дифференциального уравнения теплопроводности, и обеспечение незначительного падения температуры в стенках зонда; 5) обеспечение постоянства термического сопротивления по всей длине зонда.

И, наконец, должно выполняться важнейшее требование: 6) обеспечение высокой температурной чувствительности зонда.

С учетом вышесказанного, предложена следующая конструкция зонда.



В качестве внешней оболочки зонда используются стандартные трубки из нержавеющей стали с наружным диаметром от 5 до 2 мм и общей длиной 200 мм.

В оболочке жестко монтируется спиральный нагреватель и термочувствительный элемент.

Нагреватель выполняется из манганиновой проволоки диаметром 0,08 мм. Длина спирального нагревателя (рабочая длина зонда) варьировалась от 13 до 130 мм. Проволока наматывается на трубчатый каркас из кварцевого стекла, внутри которого (по оси зонда) помещается терморезистор, регистрирующий температуру зонда.

Из многочисленных типов ПТР, выпускаемых промышленностью, для измерения температуры зонда наиболее подходит ПТР типа МТ-6 и СТЗ-18. Для обеспечения постоянства теплового контакта по всей длине зонда свободное пространство внутри оболочки заполняется эпоксидной смолой. Токопроводы от терморезистора и спирального нагревателя выводятся к 4-контактному разъему, закрепленному в конце оболочки зонда. В качестве измерительной схемы используется симметричный терморезисторный мост постоянного тока с большим сопротивлением измерителя.

Рассчитаны  $E_{доп}$  и чувствительность терморезисторной мостовой схемы. Показано, что чувствительность терморезисторного моста с большим сопротивлением измерителя почти на три порядка превышает чувствительность всех известных видов термопар.

Установка в целом выполнена в виде двух блоков. Из-

мерительный блок объединяет стабилизированные источники питания мостовой схемы и подогревной обмотки зонда и измерительную схему.

Измерительный блок подводными проводами связан со вторичным прибором, в качестве которого может быть использован любой измерительный прибор с высокоомным входом (ЭШПВ-26, Н-39, Н-37 и др.).

Получена рабочая формула для определения коэффициента теплопроводности полупроводниковым цилиндрическим зондом. Она имеет вид:

$$\lambda = K \frac{I^2}{T_0^2 \Delta U} \lg \frac{\tau_2}{\tau_1} \quad (11)$$

$$K = \frac{2,3 R_{ом} T_0^2 U}{4 \pi l \theta} \quad (12)$$

— постоянная зонда для данной мостовой схемы,

$I$  — ток подогрева,

$T_0$  — начальная температура материала,

$\Delta U$  — разность потенциалов в измерительной диагонали моста, соответствующая моментам времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$ .

Четвертая глава посвящена исследованию полупроводникового цилиндрического зонда.

В практике применения цилиндрического зонда для измерительных целей могут встретиться значительные отклонения от первоначально принятых начальных и граничных условий. Наиболее существенными из них являются следующие.

1) Наличие зазора между зондом и средой, приводящее к возникновению контактного сопротивления на границе зонд —



среда.

- 2) Наличие начального температурного градиента в образце,
- 3) Конечные размеры образца в направлении теплового потока.
- 4) Конечная длина нагревателя зонда.

Проведенные нами исследования дали возможность оценить влияние перечисленных отклонений на результаты измерений коэффициента теплопроводности и установить пределы применимости полупроводникового цилиндрического зонда с учетом этих отклонений, т.е. пределы, в которых экспериментальную модель можно считать соответствующей теоретической.

I. Влияние контактного сопротивления на границе зонд - среда. Решение дифференциального уравнения теплопроводности для случая цилиндрического зонда имеет вид (для больших времен) [2]:

$$\theta = \frac{P}{4\pi\epsilon\lambda} \left[ \ln 4F_0 - \gamma + \frac{2\lambda}{\chi_{нд}} + \frac{1}{2F_0} \left\{ \ln 4F_0 - \gamma + 1 - \frac{c_1\rho_1}{c_2\rho_2} \left( \ln 4F_0 - \gamma + \frac{2\lambda}{\chi_{нд}} \right) \right\} \right]. \quad (13)$$

Обозначим  $\ln 4F_0 - \gamma + \frac{2\lambda}{\chi_{нд}} = M$   
 $\frac{1}{2F_0} \left\{ \ln 4F_0 - \gamma + 1 - \frac{c_1\rho_1}{c_2\rho_2} \left( \ln 4F_0 - \gamma + \frac{2\lambda}{\chi_{нд}} \right) \right\} = N.$

(13) запишем в виде

$$\theta = \frac{P}{4\pi\epsilon\lambda} [M + N]. \quad (14)$$

(14) может быть использована для измерения  $\lambda$  при таких значениях  $\tau_{min}$ , т.е. при таких значениях  $F_0_{min}$ ,

когда член  $N \rightarrow 0$  и  $\theta$  становится линейной функцией  $\ln \tau$ .

Линейному участку кривой  $\theta = f(\ln \tau)$  будет соответствовать выражение

$$\theta' = \frac{P}{4\pi\epsilon\lambda} M. \quad (15)$$

Очевидно, допустимость линейной аппроксимации кривой  $\theta = f(\ln \tau)$ , определяется требуемой точностью измерений, которая может быть оценена как относительная погрешность  $\theta$ , т.е.

$$\delta = \frac{\theta - \theta'}{\theta'} = \frac{N}{M}. \quad (16)$$

Из формулы (16) легко получить выражение для  $\tau_{min}$

$$\tau_{min} = \frac{\chi^2 \left[ \frac{\ln 4F_0 - \gamma + 1}{\ln 4F_0 - \gamma + \frac{2\lambda}{\chi_{нд}}} - \frac{c_1\rho_1}{c_2\rho_2} \right]}{2\alpha\delta}. \quad (17)$$

Из (17) видно, что  $\tau_{min}$  при заданном значении  $\delta$  определяется радиусом отверстия  $\chi$ , величиной коэффициента температуропроводности материала, отношением объемных теплоемкостей зонда и среды  $\frac{c_1\rho_1}{c_2\rho_2}$  и членом  $\frac{2\lambda}{\chi_{нд}}$ , характеризующим контактное сопротивление на границе зонд - среда. Считая, что контактное сопротивление при наличии воздушного зазора определяется в основном термическим сопротивлением собственно зонда и термическим сопротивлением цилиндрической воздушной прослойки, можем записать:

$$\frac{2\lambda}{\chi_{нд}} = \frac{2\lambda R_T}{\chi_n} + \frac{2\lambda \ln \left( \frac{\chi_n + \delta}{\chi_n} \right)}{\lambda_{воз}}. \quad (18)$$

Термическое сопротивление зонда  $R_T$  можно представить как сумму термического сопротивления слоя эпоксидной смолы, находящейся между нагревателем и стенкой зонда,



и термического сопротивления внешней оболочки зонда.

В нашем случае (для зондов с  $d_n = 2,6$  мм) расчет дает значение  $R_{\tau} = 1,54 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup> град/вт. Как следует из (17), при измерении в данном материале значение  $\tau_{min}$  увеличивается с увеличением радиуса отверстия и члена  $\frac{2\lambda}{\gamma_n d}$ . Очевидно, что заполнение зазора любой средой, обладающей коэффициентом теплопроводности, большим, чем  $\lambda$  воздуха, должно привести к снижению значения  $\tau_{min}$ .

Поскольку формула (17) не является удобной для расчета,  $\tau_{min}$  следует рассчитывать методом последовательного приближения, первоначально принимая член

$$\frac{\ln 4F_0 - \gamma + 1}{\ln 4F_0 - \gamma + \frac{2\lambda}{\gamma_n d}} \approx 1,$$

тогда

$$\tau_{min} = \frac{\gamma^2 [1 - \frac{c_1 \rho_1}{c_2 \rho_2}]}{2ab} \quad (19)$$

Расчет по (19) дает приближенное значение  $\tau_{min}$ , по которому определяется  $F_0$ . Подставляя полученное значение

$F_0$  в (17), находим более точное значение  $\tau_{min}$ . При достижении  $\tau_{min}$  становится справедливой формула (15), которую запишем в виде (для  $\tau' > \tau_{min}$ )

$$\theta = \frac{P}{4\pi r \lambda} \left[ c - 2 \ln \gamma + \frac{2\lambda \ln(\frac{\gamma_n + \delta}{\gamma_n})}{\lambda_{зап.}} \right], \quad (20)$$

где  $c = \ln 4a\tau' - \gamma + \frac{2\lambda R_{\tau}}{\gamma_n}$ .

При выводе формулы для  $\lambda$  выражение (15) записывается для двух значений температуры  $\theta_1$  и  $\theta_2$ , соответствующих двум значениям времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$ , и берется их разность. Следовательно, постоянное во время измерения контактное сопротивление не влияет на результат измерения коэффициен-

та теплопроводности. Иначе говоря, прямолинейные участки

$\theta = f(\ln \tau)$  при всех диаметрах отверстий и материалов заполнителей должны быть параллельны, т.к. имеют постоянный угловой коэффициент. Кроме того, анализ (20) показывает, что прямолинейные участки  $\theta = f(\ln \tau)$  с увеличением диаметра отверстия для различных материалов заполнителей будут смещены относительно друг друга вправо по оси  $\theta$  в тех случаях, когда выполняется неравенство:

$$\left| \frac{2\lambda \ln(\frac{\gamma_n + \delta}{\gamma_n})}{\lambda_{зап.}} \right| > \left| 2 \ln \gamma \right|$$

Если же преобладающим окажется член  $2 \ln \gamma$ , то следует ожидать смещение зависимостей  $\theta = f(\ln \tau)$  влево по оси  $\theta$ . Экспериментальная проверка влияния контактного сопротивления проводилась на двух материалах - оргстекле и мраморе.

Зонд с наружным диаметром  $d_n = 2,6$  мм помещался в отверстие с диаметрами от 2,6 до 6 мм. Величина контактного сопротивления варьировалась применением в качестве заполнителя зазора между зондом и средой касторового масла, воды и ртути.

Таким образом,

- 1) зависимость  $\theta = f(\ln \tau)$  становится линейной при достижении некоторого времени  $\tau_{min}$ ,
- 2) при измерении в данном материале значение  $\tau_{min}$  зависит от контактного сопротивления на границе зонд - среда,
- 3) предложенный метод расчета позволяет получить



значения  $T_{min}$ , хорошо согласующиеся с экспериментальными данными,

4) при прочих равных условиях заполнение зазора между зондом и средой теплопроводной жидкостью или засыпкой позволяет существенно уменьшить значение  $T_{min}$ , а следовательно, и общее время измерения.

II. Влияние начального температурного градиента в образце на результаты измерения коэффициента теплопроводности.

Рассмотрены два случая.

1) Постоянный или медленно изменяющийся температурный градиент, когда распределение температуры в образце сохраняется с достаточной степенью точности постоянным за время измерения,

2) Изменяющийся во времени температурный градиент, когда распределение температуры в образце заметно меняется за время измерения.

Экспериментально показано, что постоянный температурный градиент не влияет на измерение коэффициента теплопроводности. Эксперимент сводится к следующему. В плите из пенопласта ПС-4 ( $\rho = 40 \text{ кг/м}^3$ ) создавался температурный градиент от 0 до 2 град/см. Зонды располагались параллельно, перпендикулярно и под углом  $45^\circ$  к внешнему тепловому потоку.

В результате измерений получено 99 значений  $\lambda$ . Результаты статистической внутри- и междусерийной обработки убедительно свидетельствуют об отсутствии систематиче-

ской погрешности в результатах измерений.

Во втором случае, при температурном градиенте, заметно изменяющемся во время измерения, фиксируемый рост температуры будет определяться не только источником постоянной мощности (зонд), но и внешним неучтенным источником тепла. Значение  $\lambda$ , измеренное таким образом, не будет соответствовать истинному значению коэффициента теплопроводности. Для компенсации изменения температуры, обусловленного внешним источником тепла, следует использовать дополнительный полупроводниковый терморезистор, включенный в мостовую схему в качестве сопротивления  $\chi_2$ . Для экспериментальной проверки вышесказанного нами была применена симметричная мостовая схема, где в качестве  $\chi_1$  служил рабочий зонд, а в качестве  $\chi_2$  - идентичный ему зонд, нагреватель которого не включался во время измерений. Плита из органического стекла нагревалась с помощью внешнего лучистого источника тепла. Средняя скорость нагрева составляла 2 град/мин. За время измерения плита нагревалась на  $6-8^\circ$ . Проведена серия измерений, в результате обработки получено 10 значений  $\lambda$  органического стекла при  $320-330^\circ\text{K}$ . Полученные данные  $\lambda = 0,197 \text{ Вт/м град}$ ,  $\sigma_\lambda = 0,0029 \text{ Вт/м град}$  говорят о том, что данную компенсационную схему с успехом можно применять для измерения коэффициента теплопроводности при наличии быстро меняющегося температурного градиента.

III. Влияние конечных размеров образца на результаты измерения коэффициента теплопроводности.

Поставлена задача: оценить теоретически и экспериментально влияние конечных поперечных размеров образца на ре-



зультаты измерения  $\lambda$  и дать аналитическое выражение для минимальных размеров образца, пригодных для измерения.

При анализе использован вариант решения дифференциального уравнения теплопроводности для линейного источника тепла, помещенного в неограниченную среду вида:

$$\vartheta = \frac{\rho}{2\pi\lambda l} Y(x), \quad (21)$$

где  $\vartheta$  - температура любой точки среды,

$Y(x)$  - функция Бесселя,

$$x = \frac{r}{2\sqrt{\alpha\tau}}$$

Допустим, что за время  $\tau_{max}$  температурная волна достигла границы образца и температура среды на расстоянии  $r$  от линейного источника тепла стала равна  $\vartheta$ .

Тогда

$$\rho = 2x\sqrt{\alpha\tau_{max}} \quad (22)$$

Выразим  $Y(x)$  из (21)

$$Y(x) = \frac{2\pi\lambda l e \vartheta}{\rho} \quad (23)$$

и, воспользовавшись таблицами интеграла  $Y(x)$ , находим величину  $x$ , при которой  $Y(x)$  имеет данное значение (23).

Тогда (22) может быть использовано для определения минимального поперечного размера образца  $\rho$ . Примем  $\epsilon_0 =$

$\frac{\vartheta}{\theta} = 1\%$ , где  $\theta$  - максимальная избыточная температура зонда за время измерения.

Проведенный расчет для  $Y(x)$ ,  $x$ ,  $\frac{\alpha\tau_{max}}{\rho^2}$  и  $\rho$  для органического стекла, эбонита и пластилина дает значение:

$$\rho \approx 3\sqrt{\alpha\tau_{max}} \quad (24)$$

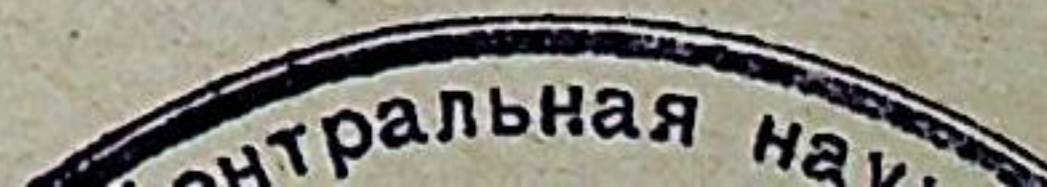
Экспериментальная проверка вышесказанного проводилась на образцах эбонита, пластилина и мрамора различных диаметров  $2\rho$ . Зонд помещался в центре образца, т.е. на расстоянии  $\rho$  от его границы. Испытуемые образцы находились в воздухе и воде. Полученные расчетные и экспериментальные зависимости позволяют сделать следующие выводы.

1) Минимальный поперечный размер образца материала, пригодный для измерения методом цилиндрического зонда, определяется коэффициентом температуропроводности материала и временем измерения и не зависит от свойств среды, окружающей образец.

2) Значения  $\rho$ , удовлетворяющие (24), обеспечивают надежные результаты коэффициента теплопроводности при измерении в образцах ограниченных размеров.

3) При достижении  $\tau_{max}$  нарушается линейный ход зависимости  $\theta = f(\ln \tau)$ , причем скорость изменения температуры увеличивается, если материал находится в среде с меньшим коэффициентом теплопроводности. В противоположном случае скорость изменения температуры уменьшается.

IV. Влияние конечной длины зонда на результаты измерения коэффициента теплопроводности. Сравнение решений дифференциального уравнения теплопроводности для бесконечно длинной и полубесконечной нитей приводит к заключению, что измерение коэффициента теплопроводности "коротким" зондом дает завышенное значение коэффициента теплопроводности. А рабочая допускаемая длина зонда определяется величиной коэффициента температуропроводности и временем измерения.





Однако, как известно [3], для реальных зондов, имеющих конечный радиус, погрешность, обусловленная развитием осевого потока, существенным образом зависит от отношения длины зонда к его диаметру.

Проведенный расчет показывает, что для большинства строительных материалов отношение  $\frac{l}{d_n} = 30$  дает погрешность, обусловленную развитием осевого потока, не более 1% при времени измерения около 3 минут. Экспериментальная проверка вышесказанного проводилась для органического стекла, кварцевого песка, пенополистирола ( $\rho = 40 \text{ кг/м}^3$ ) и мрамора. Для измерений использовались зонды с  $\frac{l}{d_n} = 5; 9,2; 16,1; 19,2; 23; 31; 38,5$  и  $50$ . Полученные экспериментальные данные представлены в виде графиков зависимостей

$$\lambda_{\text{изм.}} = f\left(\frac{l}{d_n}\right)$$

Анализ зависимостей показал, что: 1) короткие зонды ( $\frac{l}{d_n} < 30$ ) дают завышенные значения коэффициентов теплопроводности; 2) зонды со значениями  $\frac{l}{d_n} \approx 30$  могут быть использованы для измерения  $\lambda$  всех строительных материалов; 3) в тех случаях, когда допустимое значение погрешности, обусловленной наличием осевого потока, оставляет величину 3-5%, для измерения коэффициента теплопроводности большинства строительных материалов могут быть использованы зонды с  $\frac{l}{d_n} = 25$  и  $20$ .

У. Измерение коэффициента температуропроводности с помощью полупроводникового цилиндрического зонда. Проведена сравнительная оценка способов измерения коэффициента температуропроводности методом зонда.

Рассмотрены методы, предложенные Блэквеллом [2] и Скайбом [4]. Решение дифференциального уравнения теплопроводности создает принципиальную возможность для определения коэффициента температуропроводности материала методом зонда. Однако при расчете коэффициента температуропроводности требуется знание точного значения коэффициента теплообмена на границе зонд - среда ( $\alpha$ ), поскольку в формулу для  $A$  входит член  $\exp\left(-\frac{2\lambda}{\tau \alpha d}\right)$ . Метод определения  $\alpha$  и  $A$ , предложенный Блэквеллом, основывается на решении дифференциального уравнения теплопроводности для "малых времен" при

$$\tau_n^2/a_1 \ll \tau \ll \tau_n^2/a_2 \quad (25)$$

В нашем случае это решение можно использовать лишь для материалов с  $a_2 \approx 10^{-7} \text{ м}^2/\text{сек}$ . Для них (25) имеет вид:  $0,17 \text{ сек} \ll \tau \ll 17 \text{ сек}$ . Тогда как, для материалов с  $a_2 \approx 10^{-6} \text{ м}^2/\text{сек}$  по истечении менее чем 2 сек с начала нагревания решение для малых времен теряет силу. Это обстоятельство накладывает принципиальное ограничение на возможность определения  $A$  по методу Блэквелла. Кроме того, графоаналитическое определение  $\alpha$  не может быть проведено с достаточной степенью точности (что определяется значительными погрешностями в определении  $\tau, \tau^2$



и  $\tau^{1/2}$ , входящих в формулу для  $\alpha$ ). Это, в свою очередь, приводит к существенным ошибкам в определении коэффициента температуропроводности. Проведенная нами серия измерений  $\alpha$  оргстекла по методу Блеквелла показывает, что относительная погрешность отдельных измерений может превышать 50%.

Метод Скайба основывается на решении дифференциального уравнения теплопроводности без учета контактного сопротивления на границе зонд - среда и также приводит к существенной систематической погрешности. Вместе с тем, метод Скайба является достаточно трудоемким. Поэтому в работе предлагается метод определения  $\alpha$  с использованием расчетного значения контактного сопротивления на границе зонд - среда. Однако данный метод дает удовлетворительные результаты лишь при выполнении условия  $\frac{\theta}{\rho} \gg 2$ .

Все вышесказанное позволяет утверждать, что определение коэффициента температуропроводности непосредственно методом цилиндрического зонда весьма трудоемко и в большинстве случаев не дает удовлетворительных результатов.

Вместе с тем исследуемый прибор может служить для измерения температуры и определения темпа охлаждения. Поэтому целесообразно при определении коэффициента температуропроводности воспользоваться методом акалориметра. Метод акалориметра является наиболее простым и надежным методом регулярного режима и доступен для любой лаборатории.

Нами были произведены измерения коэффициента температуропроводности ряда материалов методом акалориметра с

использованием зонда в качестве термоприемника. Измерения проводились на образцах материалов различных размеров и при разных температурных перепадах. Полученные значения находятся в хорошем согласии с литературными данными. Небольшое значение относительной погрешности (0,5-2%) характеризует хорошую воспроизводимость результатов измерений.

Полученные данные позволяют рекомендовать применение зонда для определения коэффициентов температуропроводности методом акалориметра.

VI. Приводится расчет оптимального тока подогрева зонда. При прочих равных условиях характер кривой  $\theta = f(\ln \tau)$  существенно зависит от величины тока подогрева зонда. Показано, что величина проекции линейного участка зависимости  $\theta = f(\ln \tau) - \Delta \tau$  на ось  $U$  при некотором токе имеет максимальное значение.

Такой ток назван оптимальным током.

Для оптимального тока получено выражение

$$I_{opt} = 4T_0 W \sqrt{\frac{\lambda}{\ln 4F_0 - \gamma + \frac{2\lambda}{r_{нд}}}}, \quad (26)$$

где  $W = \sqrt{\frac{\pi r U_{max}}{R_{ом} E B}}$  - постоянная для данного зонда и мостовой схемы.

Рекомендуется проводить измерения при токе подогрева близком к  $I_{opt}$ .  $\tau_{max}$  выбирается так, чтобы получить достаточно протяженный линейный участок  $\Delta \tau = \tau_{max} - \tau_{min}$ . (Расчет  $\tau_{min}$  проводится по (19) и (17)).

VII. Рассчитана инструментальная погрешность прибора. Показано, что она, в основном, определяется погрешностью



вторичного самопишущего устройства. Так, при использовании на выходе мостовой схемы ЭПВ-26,  $E_{\lambda} = 4,5\%$ ; при записи зависимости  $\theta = f(\tau)$  на ленте Н-39, относительная погрешность увеличивается до 8%.

В пятой главе рассматриваются некоторые частные случаи применения полупроводникового цилиндрического зонда. Приводятся результаты измерения коэффициента теплопроводности влажных материалов (кварцевый песок, суглинок пылеватый, газобетон и др.) в широком диапазоне влажностей ( $W$ ) - от воздушно-сухого до полного насыщения. Избыточная температура зонда изменялась от 0,15 до 40°C. Полученные экспериментальные данные представлены графически в виде зависимостей  $\lambda = f(W)$ . Характерно, что в области гигроскопического влагосодержания для всех исследуемых материалов  $\lambda = f(W)$  является линейной функцией. Измеренное значение  $\lambda$  в этой области не зависит от температурного перепада.

Все это позволяет использовать полупроводниковый цилиндрический зонд для измерения влажности строительных материалов и конструкций.

Проведены измерения коэффициента теплопроводности органического стекла при температурах от 223 до 354°К. Полученные результаты находятся в хорошем соответствии с данными ВНИИМа [5]. Максимальное отклонение экспериментальных данных от данных ВНИИМа составляет 1%.

Показано, что значение  $\tau_{min}$  зависит от отношения объемных теплоемкостей зонда и среды. Для подавляющего большинства строительных материалов  $\frac{c_1 \rho_1}{c_2 \rho_2}$  лежит в пределах от 1 до

10 и  $\tau_{min}$  не превышает 1-2 мин. Исключение составляют так называемые теплоизоляционные материалы, для которых отношение  $\frac{c_1 \rho_1}{c_2 \rho_2}$  на порядок выше. Расчетное значение  $\tau_{min}$  для ПС-4 ( $\rho = 40 \text{ кг/м}^3$ ) - около 1,5 часа. Однако, как показывают экспериментальные данные, при измерениях в пенопластах в течение 3-5 мин. зависимость  $\theta = f(\ln \tau)$  имеет достаточно протяженный линейный участок. Однако, обсчет этого линейного участка приводит к заниженному значению коэффициента теплопроводности  $\sim$  в 1,4 раза по сравнению с  $\lambda$  действительным.

Значение коэффициента 1,4 получено также расчетным путем. Совпадение расчетных и экспериментальных данных дает основание для применения метода цилиндрического зонда при измерении коэффициента теплопроводности теплоизоляционных материалов как сравнительного, с введением поправочного коэффициента равного 1,4. При этом, расчетная формула для  $\lambda$  принимает вид

$$\lambda = 1,4 \cdot K \frac{T^2}{T_0^2 \Delta U} \lg \frac{\tau_2}{\tau_1} \quad (27)$$

Однако, применение зондового метода для измерения  $\lambda$  теплоизоляционных материалов требует дальнейших детальных исследований.

На кафедре физики ЛИСИ полупроводниковый цилиндрический зонд применяется с 1968 г. За это время нами были измерены коэффициенты теплопроводности целого ряда материалов различных наименований, плотностей, при различных температурах и влажностях.



Полученные экспериментальные значения находятся в хорошем согласии с литературными данными. Относительная погрешность, характеризующая воспроизводимость результатов измерений, для однородных по структуре материалов 0,5-3%, для неоднородных - достигает 6-7%.

Результаты измерения коэффициента теплопроводности оргстекла, полученные с 1968 г. по 1973 г. с помощью нескольких десятков зондов при использовании различных измерительных приборов и регистрирующих устройств, характеризуют высокую воспроизводимость результатов измерений

( $\lambda = 0,194$  Вт/м град,  $E_{\lambda} = 0,72\%$ ) от зонда к зонду и от прибора к прибору в целом. Последнее обстоятельство особенно важно, так как метод является абсолютным.

Контрольные зонды и комплект измерительной аппаратуры подвергались периодической поверке в течение ряда лет. Данные последовательных поверок положительно характеризуют стабильность зондов и приборов.

Следует отметить также, что суммарное время, затрачиваемое на подготовку образца к измерению, производство измерений и математическую обработку результатов измерений при определении  $\lambda$ , не превышает за один цикл 20-30 мин.

#### Основные выводы и результаты, полученные в работе

I. Сравнительный анализ известных методов и проведенные экспериментальные исследования показывают, что применительно к определению коэффициента теплопроводности строительных материалов и конструкций, наиболее удобным является метод цилиндрического зонда постоянной мощности.

2. Показано, что применение в качестве термочувствительного элемента полупроводникового терморезистора в совокупности с мостовой схемой с большим сопротивлением измерителя повышает температурную чувствительность метода почти на три порядка, что позволило получить качественно новый прибор с более широким диапазоном возможных применений.

3. Рассмотрено влияние контактного сопротивления на границе зонд - среда на результаты измерения коэффициента теплопроводности. Получена расчетная формула для  $T_{min}$ .

4. Рассмотрено влияние начального температурного градиента на результаты измерения коэффициента теплопроводности. Показано, что постоянный за время измерения температурный градиент не влияет на измерения  $\lambda$ . Для измерения коэффициента теплопроводности при наличии быстро меняющегося температурного градиента предложена мостовая схема с компенсирующим терморезистором.

5. Рассмотрено влияние конечных размеров образца в направлении теплового потока на результаты измерения коэффициента теплопроводности. Получена расчетная формула для  $R$  - минимального поперечного размера образца.

6. Экспериментальным путем показано, что зонды с отношением  $\frac{l}{d_n} \geq 30$  могут быть использованы для измерения  $\lambda$  всех строительных материалов.

7. Показано, что измерение коэффициента температуропроводности непосредственно методом цилиндрического зонда не дает удовлетворительных результатов. В случае необходимости определения совокупности теплофизических характеристик, т.е. коэффициентов тепло- и температуропроводности,



предложена комбинация двух абсолютных методов: метода зонда постоянной мощности и метода калориметра, осуществляемых с помощью одного прибора.

8. Получена расчетная формула для определения оптимального значения подогревного тока.

9. Произведены измерения коэффициента теплопроводности целого ряда материалов методом полупроводникового цилиндрического зонда при различных температурах и влажностях. Полученные значения находятся в хорошем согласии с литературными данными.

10. Экспериментальные данные характеризуют высокую воспроизводимость результатов измерений при использовании различных зондов и различных измерительных установок.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. МЕЛЬНИКОВА Л.Н., ОБОРИН Л.А. Терморезисторный мост с большим сопротивлением измерителя и его применение к вопросам строительной теплофизики. Физика. Краткое содержание докладов к XXV научной конференции ЛИСИ, Л, 1967.

2. ОБОРИН Л.А., МЕЛЬНИКОВА Л.Н., ЯХНИЧ Г.Р. Усовершенствованная установка для скоростного определения теплофизических констант строительных материалов по методу С.В. Волькенштейн. Физика. Краткое содержание докладов к XXV научной конференции ЛИСИ, Л, 1967.

3. ОБОРИН Л.А., МЕЛЬНИКОВА Л.Н. О линейных соотношениях для терморезисторного моста с большим сопротивлением измерителя. Известие вузов, "Приборостроение", т. XI, № 7, 1968.

4. ОБОРИН Л.А., МЕЛЬНИКОВА Л.Н. Линейные свойства симметричного терморезисторного моста в совокупности с электронным потенциометром. I Всесоюзная НТК по метрологии. Тезисы докладов, Свердловск, 1968.

5. МЕЛЬНИКОВА Л.Н., ОБОРИН Л.А. Метод экспериментального определения термической постоянной времени, полупроводниковых терморезисторов. Физика. Краткое содержание докладов к XXVI научной конференции ЛИСИ, Л, 1968.

6. ОБОРИН Л.А., МЕЛЬНИКОВА Л.Н., ЯХНИЧ Г.Р., БЫСТРОВ В.А. Полупроводниковый игольчатый зонд для определения коэффициента теплопроводности кусковых и насыпных строительных материалов. Физика. Краткое содержание докладов XXVI научной конференции ЛИСИ, Л, 1969.

7. ОБОРИН Л.А., МЕЛЬНИКОВА Л.Н. О влиянии произвольного начального распределения температур в испытуемом образце материала на результаты измерения коэффициента теплопроводности. Физика. Краткое содержание докладов к XXVIII научной конференции ЛИСИ, Л, 1970.

8. МЕЛЬНИКОВА Л.Н. Расчет оптимального тока подогрева теплофизического зонда. Физика. Материалы к XXIX научной конференции ЛИСИ, Л, 1970.

9. ОБОРИН Л.А., МЕЛЬНИКОВА Л.Н. Измерение теплопроводности строительных материалов и изделий методом полупроводникового цилиндрического зонда. "Промышленность полимерных мягких кровельных и теплоизоляционных материалов". Техническая информация. М, 1971.

10. МЕЛЬНИКОВА Л.Н. Об особенностях измерения теплопроводности легких материалов методом цилиндрического зонда. Физика. Краткое содержание докладов секции к XXX научной конференции ЛИСИ, Л, 1971.

11. МЕЛЬНИКОВА Л.Н. О влиянии контактного сопротивления на измерения цилиндрического зонда. Физика. Краткое содержание докладов к XXXI научной конференции ЛИСИ, Л, 1973.

Материалы диссертации докладывались на XXV, XXVI, XXVII, XXVIII, XXIX, XXX, XXXI научных конференциях ЛИСИ в 1967-1973 гг., на I Всесоюзной научно-технической конференции по метрологии, Свердловск 1968 г. и на VII научной конференции кафедр архитектуры, Харьков, 1973 г.

Цитируемая литература:

1. ОБОРИН Л.А. Физика. Краткое содержание докладов к XXX научной конференции ЛИСИ, 1972.

2. Blackwell J.H. J. Ap. Physics, v 20, № 2, 137, 1954.

3. Blackwell J.H. Canad. J. Phys. v 34, 412, 1956.

4. Skeib J. Zs. Met., 4, 32, 1950.

5. СЕРГЕЕВ О.А. Метрологические основы теплофизических измерений, М., 1972.