

Санкт-Петербургский государственный университет
информационных технологий, механики и оптики

Д.П.Волков, В.А.Кораблев, Ю.П.Заричняк

Приборы и методы для измерения теплофизических свойств веществ

Методические указания к лабораторным работам по курсу
«Теплофизические свойства веществ»



Санкт-Петербург
2006

Д.П.Волков, В.А.Кораблев, Ю.П.Заричняк, Методические указания к лабораторным работам по курсу «Теплофизические свойства веществ». – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2006. - 66 с.

Методические указания к лабораторным работам составлены соответствии с программой курса "Теплофизические свойства веществ" Государственного стандарта высшего и профессионального образования для направления подготовки дипломированных специалистов 140402 - Теплофизика. В настоящее издание вошли лабораторные работы, посвященные измерению коэффициентов теплопроводности компаундов, температурных коэффициентов линейного расширения материалов, исследованию теплопроводности металлов, теплоизоляционных материалов, истинной теплоемкости материалов.

Подготовлено на кафедре компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга.

Одобрено к изданию на заседании кафедры КТФ и ЭМ 20 сентября 2005 года. Одобрено на заседании методической комиссии инженерно-физического факультета 17 января 2006 года.

© Авторы: В.А. Кораблев, Д.П. Волков,
Ю.П. Заричняк, 2006.

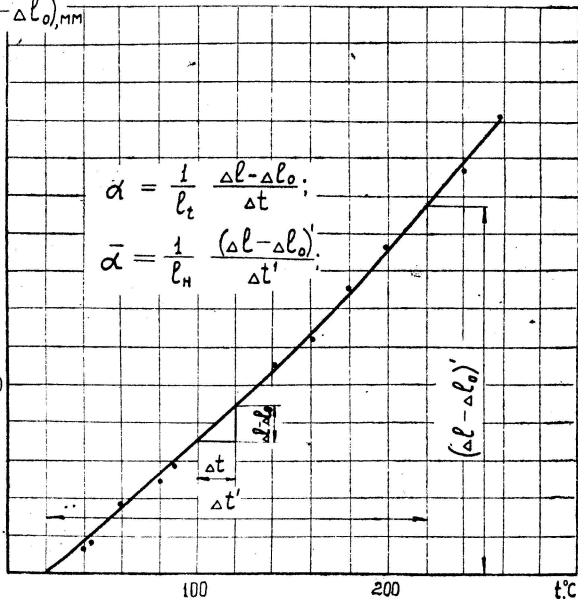
© Санкт-Петербургский государственный
университет информационных технологий,
механики и оптики, 2006.

$(\Delta l - \Delta l_0)_{\text{mm}}$

$$\alpha = \frac{1}{l_t} \frac{\Delta l - \Delta l_0}{\Delta t};$$

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{l_H} \frac{(\Delta l - \Delta l_0)'}{\Delta t'};$$

1.0



100

200

$t^{\circ}\text{C}$

Оглавление

Введение	4
Лабораторная работа №1.	
Измерение коэффициентов теплопроводности теплоизоляционных материалов стационарным методом.....	5
Лабораторная работа № 2	
Исследование теплопроводности металлов	12
Лабораторная работа № 3	
Исследование коэффициентов теплопроводности неметаллических материалов.....	19
Лабораторная работа № 4	
Исследование теплопроводности теплоизоляционных материалов.....	33
Лабораторная работа № 5	
Определение средней теплоемкости и энтальпии методом смещения.....	41
Лабораторная работа № 6	
Исследование истинной теплоемкости материалов.....	50
Лабораторная работа № 7	
Измерение температурных коэффициентов линейного расширения материалов.....	57

Введение

Настоящий лабораторный практикум составляет часть методического обеспечения учебного курса «Теплофизические свойства веществ», который читается студентам кафедры компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга СПб ГУ ИТМО.

В сборник включено семь лабораторных работ, каждая из которых рассчитана на четыре часа занятий.

Основная цель лабораторных работ – помочь студентам овладеть практическими навыками определения ряда теплофизических характеристик материалов (теплопроводности, теплоемкости, коэффициентов линейного расширения), а также измерения ряда величин (температуры, тепловых потоков и др.) важных при определении теплофизических свойств веществ.

Вводная часть к каждой работе помогает наряду с лекционным материалом усвоить теоретические и экспериментальные данные по вопросам предстоящей работы. Далее излагаются цели и задачи работы, описания установок, порядок проведения и требования к обработке результатов измерений.

Вопросы, связанные с оценками погрешностей измерений, рассматриваются студентами самостоятельно на основе знаний, полученных в курсе «Основы метрологии и планирование эксперимента».

Начало теплофизической научной школы в университете было положено организацией в 1938 году кафедры приборов теплосилового контроля, заведующим которой стал профессор, доктор технических наук Г.М.Кондратьев (1887-1958). В 1954 году вышла в свет его монография «Регулярный тепловой режим». Изложенные в ней идеи впоследствии были успешно применены в различных областях, например, при создании нового типа приборов для исследования теплофизических свойств веществ и параметров теплообмена. В начале 50-х годов началась разработка методов теплового расчета радиоэлектронных устройств, а в дальнейшем и других приборов – оптических, оптико-электронных, гироскопических. Серия этих работ была выполнена под руководством Заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, профессора, доктора технических наук Дульнева Г.Н., возглавлявшего кафедру с 1958 года по 1995 год. В результате был создан новый математический аппарат анализа теплового режима сложных технических систем и приборов, разработаны методы проектирования приборов с заданным тепловым режимом. Комплекс этих работ признается и в нашей стране, и за рубежом как новое научное направление в теплофизике. Кафедра приборов теплосилового контроля за свою многолетнюю историю не раз изменяла свое название. Так, с 1947 года она именовалась кафедрой тепловых и контрольно-измерительных приборов, с 1965 года – кафедрой теплофизики, с 1991 года – кафедрой компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга. Однако основным направлением ее научной и педагогической деятельности оставалось применение учения о теплообмене в физике и приборостроении. С 1995 года заведующим кафедрой является профессор, доктор технических наук А.В.Шарков.

Многолетняя деятельность кафедры привела к созданию научной и педагогической школы теплофизиков-приборостроителей, из которой вышли доктора наук А.Н.Гордов, А.И.Лазарев, Г.Н.Дульнев, Б.Н.Олейник, Е.С.Платунов, Н.А.Ярышев, В.Н.Васильев, Ю.П.Заричняк, А.В.Шарков и другие ученые-теплофизики.

Сотрудники кафедры принимали участие в разработке нового поколения вычислительных машин, исследовании термооптических явлений в космических комплексах, в реализации международных программ космических исследований. Так, предложенные на кафедре методы были использованы при проектировании телевизионных камер космических

аппаратов в проекте «ВЕГА», при создании лазерного устройства в проекте «ФОБОС». Возможности разработанных на кафедре методов математического моделирования тепловых процессов в сложных системах и технике теплофизического эксперимента были продемонстрированы при анализе процессов теплообмена в организме человека; при создании электрогенераторов, работа которых использует явления сверхпроводимости; при создании оригинальных образцов оборонной, медицинской и измерительной техники.

В рамках традиционных направлений развиваются работы по созданию методов и приборов для измерения температуры, тепловых потоков, теплофизических свойств веществ, исследования коэффициентов переноса в неоднородных средах, а также работы по созданию принципиально новых композиционных материалов – особо прочных, термостойких, теплоизоляционных и т.д.

В последние годы наряду с традиционными научными направлениями появился ряд новых направлений, связанных с экологическим мониторингом, энергосберегающими технологиями, биологией и медицинским теплофизическим приборостроением. На базе ведущихся на кафедре научных исследований осуществляется обучение молодых специалистов, первый выпуск которых по специальности «Теплофизика» состоялся в 1969 году. В 1998 году кафедра получила также право обучения по новому для нашего университета направлению – «Техническая физика». В июне 1998 года состоялся первый выпуск бакалавров, а в 2000 году – магистров.

На кафедре ведется подготовка научных кадров высшей квалификации в аспирантуре и докторантуре по специальностям 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника» и 05.11.01 «Приборы и методы измерения тепловых величин». Сейчас коллектив кафедры продолжает развитие как ставших уже традиционными научных направлений и направлений подготовки специалистов, так и ведет поиск в новых областях науки и техники.

Приборы и методы для измерения
теплофизических свойств веществ

Методические указания
к лабораторным работам по курсу
«Теплофизические свойства веществ»

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2006

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ
Методические указания к лабораторным работам

Компьютерный набор и верстка

И.А. Васильева

Дизайн

И.А. Васильева

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Санкт-Петербургского
государственного университета информационных технологий,
механики и оптики

Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати 20.11.04

Тираж 100 экз.

Объем 3 п.л. Заказ № 833

Отпечатано на ризографе

Лабораторная работа № 1

Измерение коэффициентов теплопроводности теплоизоляционных материалов стационарным методом

Цель работы – ознакомление со стационарным методом измерения коэффициентов теплопроводности теплоизоляционных материалов и проведение измерений теплопроводности на приборах.

Стационарные методы измерения теплопроводности, простейшие по теоретическому обоснованию, начали развиваться раньше других методов и в настоящее время достигли значительного совершенства. С их помощью исследуются самые различные материалы: металлы, полупроводники, теплоизоляторы, волокна, порошки, жидкости и газы.

Ознакомимся с общими принципами работы приборов для измерения теплопроводности теплоизоляционных материалов.

Для изучения теплопроводности твердых теплоизоляционных материалов, неметаллических жидкостей и газов применяются, в основном, методы, в которых испытуемый образец имеет форму пластины, трубы или полого шара и обеспечиваются условия для протекания через образец одномерного теплового потока.

Рассмотрим плоскопараллельную пластину, пронизываемую одномерным тепловым потоком с линиями тока, перпендикулярными к поверхности пластины. Теплообмен теплопроводностью через такую стенку происходит согласно закону Фурье:

$$q = \lambda \frac{t_1 - t_2}{\delta}, \quad (1)$$

где q – удельный тепловой поток, пронизывающий пластину, Вт/м²; λ – коэффициент теплопроводности материала пластины, Вт/(м·К); t_1 , t_2 – температуры боковых поверхностей пластины, К; δ – толщина пластины, м.

Формула (1) применяется в том случае, если коэффициент λ принимается постоянным, не зависящим от температуры, что справедливо при малых перепадах температуры ($t_1 - t_2$). В общем случае следует учитывать температурную зависимость коэффициента теплопроводности материала. Известно, что для большинства теплоизоляционных материалов в узком интервале температур (до 50 К) величина коэффициента теплопроводности с достаточной степенью точности описывается линейной функцией вида

$$\lambda = f(t) = \lambda_0(1 + K_\lambda t). \quad (2)$$

Для большинства материалов $K_\lambda > 0$. Однако, некоторые материалы, в том числе и кристаллы, обладают свойством уменьшения λ с возрастанием температуры и часто по сложному закону. Если ограничиться случаями $K_\lambda = const$, то для расчетов по формуле (1) берется среднее значение $\bar{\lambda}$

$$\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_0(1 + K_\lambda \bar{t}), \text{ где } \bar{t} = \frac{t_1 + t_2}{2}, \quad (3)$$

тогда

$$q = \lambda(\bar{t}) \frac{t_1 - t_2}{\delta}. \quad (4)$$

Напомним, что в основе зависимостей (1) и (4) лежит допущение о бесконечной протяженности пластины. В реальной схеме опыта образцы имеют конечные размеры. В связи с этим практическая реализация метода имеет свои особенности, связанные в первую очередь с появлением утечек тепла через боковые грани образца. При прохождении одномерного теплового потока через бесконечную пластину все линии тока параллельны друг другу и перпендикулярны сторонам пластины, т. е. все тепло, поступающее к одной его поверхности, переходит к другой без изменения поверхностной плотности.

При использовании образцов конечных размеров часть теплового потока, поступающего в образец, рассеивается во внешнюю среду через его боковую поверхность и на противоположную поверхность попадает измененный поток. Поэтому тепловой поток становится неоднородным, а линии тока вблизи боковой поверхности искривляются, что необходимо учитывать при разработке методики проведения эксперимента.

Практическая реализация методов пластины связана также с трудностями измерения температуры поверхностей на горячей t_1 и холодной t_2 сторонах образца, разность которых входит в расчетную формулу (4). Наиболее удобны для этой цели термопары, но монтаж их непосредственно на образце затруднен. Поэтому образец – пластину помещают между двумя плоскими металлическими пластинами (постоянные элементы установки), а спаи термопар монтируют в них вблизи рабочих поверхностей.

Однако монтаж термопар за пределами образца имеет свои недостатки, так как на границах контакта образца с металлическими пластинами возникают контактные тепловые сопротивления R_x . Величина R_x зависит от качества поверхности контактирующих плоскостей, теплопроводности газовой прослойки и величины внешнего сжатия пластин и отличаются заметной нестабильностью. Наличие R_x не дает возможности использовать метод пластины с вынесенными за пределы образца термопарами для

исследования теплопроводности материалов при $\lambda > 10$ Вт/(м·К), что существенно сужает границы его практического применения. Уменьшить R_x можно, если увеличить давление сжатия между пластинами, повысить качество обработки поверхностей образцов или смазать контактирующие плоскости какой-либо жидкостью, коэффициент теплопроводности которой близок к теплопроводности исследуемого материала. Смазка заполняет воздушные пространства между соприкасающимися плоскостями и вытесняет оттуда воздух. Если образцы изготовлены из воздушно-пористых материалов малой плотности, или исследуются газы или жидкости, то влиянием контактных сопротивлений можно пренебречь.

В настоящее время известно много разнообразных практических схем стационарного метода плоского слоя для измерения теплопроводности материалов.

Описание установки

Схема сравнительного λ -калориметра приведена на рис.1. Основными элементами установки являются металлический сердечник 1 с электрическим нагревателем 2, окруженный разъемной металлической оболочкой 4,5. Сердечник теплоизолирован от нижней половины оболочки пенопластом 3. Металлический стержень 6 в верхней оболочке с помощью микрометрического устройства 7 может плавно перемещаться и обеспечивать тепловой контакт оболочки с верхней поверхностью образца 9.

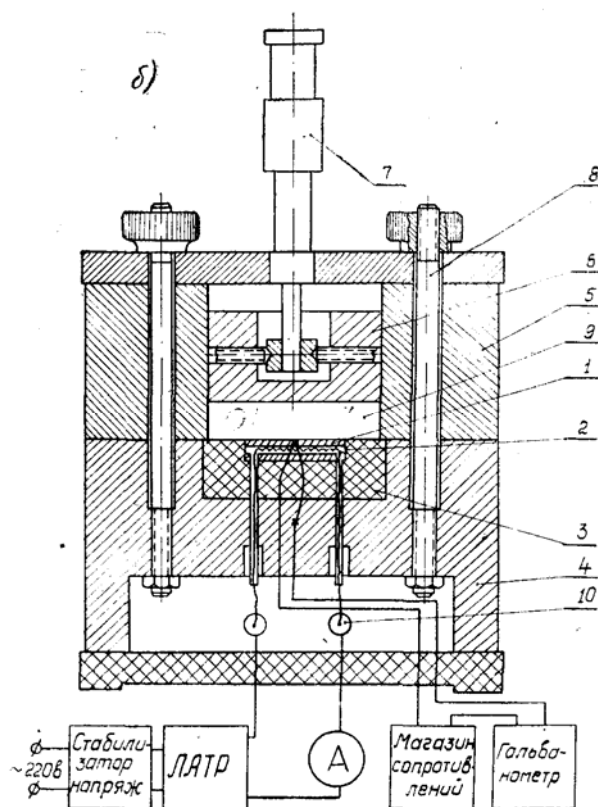


Рис. 1. Схема сравнительного λ -калориметра

Нижняя поверхность образца в течение опыта находится в контакте с открытой поверхностью сердечника. В сердечник 1 и нижнюю половину оболочки вмонтированы спаи дифференциальной термопары. Обе половины оболочки 4,5 соединяются между собой тремя шпильками 8 с навинчивающимися на них гайками и находятся между собой в хорошем теплообмене через притертые плоские грани. К клеммам оболочки 10 изнутри подключен электронагреватель. Электроды термопары выходят из оболочки в виде шнура и подключаются к гальванометру М195. К клеммам нагревателя электропитание подается от ЛАТРа. Напряжение на ЛАТРе устанавливается по указанию преподавателя в пределах от 40 до 60 В.

Исследуются образцы двух типов: диаметром 30 и 48 мм.

В опыте измеряется полный тепловой поток Q_H , рассеиваемый нагревателем, и перепад температуры ϑ между сердечником и корпусом, что позволяет определить полную тепловую проводимость σ_Σ между указанными деталями. Полная проводимость состоит из суммы параллельно включенных проводимостей пенопластовой прокладки и исследуемого образца σ_x , т. е. $\sigma_x = \sigma_\Sigma - \sigma$. Тепловой поток нагревателя перераспределяется между пенопластовой прослойкой и образцом пропорционально проводимостям, т.е.

$$Q_x = \frac{Q_H}{\sigma_\Sigma} (\sigma_\Sigma - \sigma) = \vartheta \left(\frac{Q_H}{\vartheta} - \sigma \right). \quad (5)$$

В приборе предусмотрена возможность экспериментального учета тепловых потерь путем градуировки прибора. Градуировка проводится на материале с известным коэффициентом теплопроводности λ . Найденные величины σ и φ являются «постоянными» прибора. Следует заметить, что постоянная σ учитывает проводимость стоек сердечника, термопар, выводов нагревателя.

Коэффициенты теплопроводности материала образцов диаметром 30 мм (диаметр совпадает с диаметром сердечника) вычисляют по формуле

$$\lambda = \frac{\delta}{S_c} \left[\frac{Q_H}{\vartheta} - \sigma \right] \frac{\delta}{S_c} \left[\frac{I^2 R_H}{K_t n} - \sigma \right], \quad (6)$$

а диаметром 48 мм – по формуле

$$\lambda = \frac{\delta}{S_c \varphi} \left[\frac{Q_H}{\vartheta} - \sigma \right] = \frac{\delta}{S_c \varphi} \left[\frac{I^2 R_H}{K_t n} - \sigma \right], \quad (7)$$

где δ - толщина образца, м; S_c - площадь поперечного сечения сердечника, м²; $\varphi = \varphi(\delta)$ - коэффициент рассеяния теплового потока в образце толщиной δ (вычисляется по формуле $\varphi = 0,92 + 77,8 \cdot \delta$); I - показания амперметра, А; R_H -

электрическое сопротивление нагревателя, Ом; K_t - чувствительность термопары, К/мВ; n - показания термопары по шкале прибора, мВ; σ - эффективная тепловая проводимость между сердечником и нижней половиной оболочки через пенопластовую прокладку (величина, обратная суммарному тепловому сопротивлению пенопластовой прокладки, стоек, термопар, выводов нагревателя).

В лабораторной установке: $S_c = 7,07 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$; $\sigma = 2 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/К}$; $R_H = 22,33 \text{ Ом}$; $K_t = 24,5 \text{ К/мВ}$ при добавочном сопротивлении цепи гальванометра $R_D = 500 \text{ Ом}$.

Формула, учитывающая контактное сопротивление $2R_K$, для образцов диаметром 30 мм имеет вид

$$\lambda = \delta \left(\frac{S_c}{\frac{Q_H}{\vartheta} - \sigma} - 2R_K \right)^{-1}, \quad (8)$$

а для образцов диаметром 48 мм –

$$\lambda = \delta \left(\frac{S_c \varphi}{\frac{Q_H}{\vartheta} - \sigma} - 2R_K \right)^{-1}, \quad (9)$$

где R_K - контактное сопротивление, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$.

Для образцов со шлифованными поверхностями и при использовании жидкой контактной смазки (касторовое масло, кремнеорганическое масло) $R_K = 1 \cdot 10^{-4} (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$.

Порядок подготовки и проведения опыта

1. Установить образец между разъемными частями металлической оболочки 4 и 5, смазав его с обеих сторон контактной смазкой, нанеся не более одной капли на поверхность образца и растерев пальцем до тонкого равномерного слоя. Большое количество смазки может внести погрешность в измеренное значение λ и загрязнить рабочие детали прибора.

2. Включить прибор и установить ток в нагревателе по указанию преподавателя.

3. После установления стационарного состояния снять показания амперметра и гальванометра (через 30 мин).

4. Выключить прибор и гальванометр из сети.

5. По полученным опытным данным вычислить значения λ исследуемого образца. Обратит внимание на величину боковых утечек тепла и на роль контактных тепловых сопротивлений.

Задание по работе

1. Ознакомиться с описанием методов измерения теплопроводности.
2. Провести измерение двух образцов на сравнительном λ -калориметре.
3. В отчете представить схему измерительного устройства и результаты измерений.
4. Сопоставить полученные результаты с литературными данными для аналогичных материалов.

Контрольные вопросы

1. В чем недостатки монтажа термопар внутри образца?
2. В чем недостатки монтажа термопар в контактных пластинах?
3. От каких факторов зависит величина контактного теплового сопротивления?
4. Способы уменьшения контактного сопротивления.
5. Какие схемы реализации абсолютного метода пластины для измерения теплопроводности материалов Вам известны?
6. Какие сравнительные методы пластины для измерения теплопроводности материалов Вы знаете?
7. Какие способы измерения теплового потока применяются в стационарных плоских приборах?
8. Какие способы устранения бокового теплообмена применяют в плоских стационарных приборах?
9. С какой целью обеспечивается хороший тепловой контакт между нижней и верхней половинами блоков?
10. Как экспериментально определить тепловую проводимость между сердечником и корпусом прибора?
11. Включает ли постоянная σ тепловую проводимость пенопласта, выводов нагревателя, термопар, проводимость образца? Как определить величину σ ?
12. Из каких материалов изготовлена дифференциальная термопара в приборе? Какова ее чувствительность?
13. Как учитываются в приборе потери тепла с боковой поверхности образцов диаметром 30 и 48 мм?
14. Можно ли снимать показания, не дожидаясь установления стационарного состояния?
15. Как измеряется тепловой поток, проходящий через образец?
16. Каков диапазон измеряемых на приборе значений λ ? Чем обусловлены ограничения в сторону больших и меньших значений?

Литература

1. Кондратьев Г.М. Тепловые измерения. М.-Л., Машгиз, 1957.
2. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. М., Атомиздат, 1968.
3. Конспект лекций по курсу «Теплофизические свойства веществ».

Лабораторная работа № 2

Исследование теплопроводности металлов

Цель работы - ознакомление с экспериментальными методами определения теплопроводности сплавов.

Проводится измерение теплопроводности нескольких образцов на приборе ТФП-3.

Программа работы

1. Ознакомиться с теорией экспериментального метода определения теплопроводности.
2. Ознакомиться с описанием прибора типа ТФП-3.
3. Провести измерение теплопроводности образцов по указанию преподавателя (расчет и измерение теплопроводности проводятся на одних и тех же образцах).
4. Сопоставить расчетные и экспериментальные значения теплопроводности исследуемого материала, дать анализ полученных результатов.
5. В отчете представить принципиальную схему прибора ТФП-3, таблицу опытных данных, а также результаты сопоставления расчета и измерения.

Теория метода измерения

В основу работы прибора положен стационарный сравнительный метод.

Образец 1 в виде пластины и контактирующий с ним тепломер 2 помещаются между двумя металлическими массивными блоками 3 с одинаковой теплоемкостью (рис.2). Один из блоков, например, верхний, предварительно перегревается относительно нижнего на $\vartheta_H = 5-10\text{K}$. Затем нагреватель отключается и через некоторое время между блоками устанавливается близкий к стационарному тепловой поток Q , соответствующий заданному начальному перегреву верхнего блока и тепловым сопротивлением образца и тепломера. При идеальной тепловой изоляции блоков и боковых поверхностей образца и тепломера через них проходит одинаковый тепловой поток.

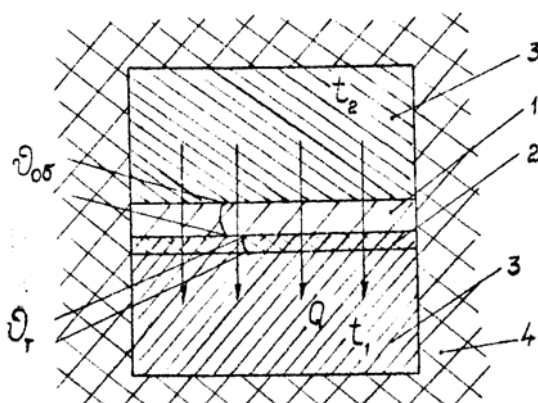


Рис.2. Тепловая схема прибора.

$$Q_0=Q_T \text{ или } \lambda S \vartheta_0 h^{-1} = K_T \vartheta_T, \quad (1)$$

где ϑ_0, ϑ_T - перепады температуры в образце и тепломере; λ, S, h - соответственно теплопроводность, площадь поперечного сечения и высота образца; K_T - тепловая проводимость тепломера.

Непосредственно из формулы (1) получается расчетная формула для теплопроводности

$$\lambda = \frac{K_T h}{S} \frac{\vartheta_T}{\vartheta_0}. \quad (2)$$

В реальных условиях происходит изменение температуры блоков вследствие перетока тепла через образец.

Для расчета конструктивных параметров блоков и получения ограничений на режим опыта рассмотрим температурное поле неограниченной пластины $0 < x < h$ при линейном изменении ее температуры на ее границах.

Уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}; \quad (3)$$

при граничных условиях

$$t(0, \tau) = t_1 + b\tau; \quad t(h, \tau) = t_2 - b\tau; \quad t(x, 0) = t_1. \quad (4)$$

решение уравнения (3) при граничных условиях (4) в квазистационарной стадии имеет вид

$$t(x, \tau) = t_1 + b\tau + \frac{t_2 - t_1}{h} x - \frac{2b\tau}{h} + \frac{bx^2}{2a} - \frac{bx^3}{3ah} - \frac{bhx}{6a}, \quad (5)$$

и поле тепловых потоков соответственно

$$q(x, \tau) = -\lambda \frac{dt}{dx} = -\lambda \left(\frac{t_2 - t_1}{h} x - \frac{2b\tau}{h} + \frac{bx}{a} - \frac{bx^2}{ah} - \frac{bh}{6a} \right), \quad (6)$$

Тепловой поток, проходящий через образец, измеряется металлическим тепломером (рис.3).

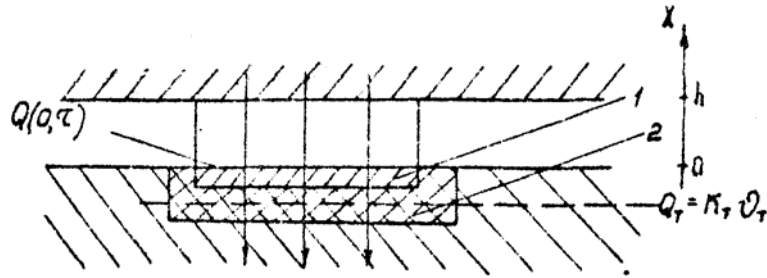


Рис.3. Металлический тепломер: 1 – пластина тепломера, 2 – рабочий слой тепломера

Поскольку тепломером измеряется поток в середине рабочего слоя, поток $Q(0, \tau)$, выходящий из образца, связан с потоком $Q_T(0, \tau)$ соотношением

$$Q(0, \tau) = Q_T(\tau) - Q_{\text{погл.}}(\tau), \quad (7)$$

где $Q(0, \tau) = q(0, \tau)S$; $Q_T(0, \tau) = K_T \vartheta_T(\tau)$; $Q_{\text{погл.}}(\tau) = C_{\Pi} b_{\Pi} = 0,5 C_T b_T \approx b(C_{\Pi} + 0,5 C_T)$.

Последнее равенство справедливо, так как между образцом и пластинкой осуществляется хороший тепловой контакт, температурное поле пластинки тепломера равномерное и $C_{\Pi} \gg 0,5 C_T$.

Тепловой поток на нижней грани образца в соответствии с выражением (6) равен $Q(0, \tau) = q(0, \tau)S = \frac{\lambda S}{h} (t_2 - t_1 - 2b\tau - \frac{bh^2}{6a})$.

Поскольку $t(0, \tau) = t_1 + b\tau$; $t(h, \tau) = t_2 - b\tau$; $\vartheta_0(\tau) = t(h, \tau) - t(0, \tau)$;

$$Q(0, \tau) = \frac{\lambda S}{h} \left[\vartheta_0(\tau) - \frac{bh^2}{6a} \right],$$

то на основании уравнения (7)

$$\frac{\lambda S}{h} \vartheta_0(\tau) - \frac{\lambda S b h^2}{6a h} = b(C_{\Pi} + 0,5 C_T) + K_T \vartheta_T(\tau).$$

Из последнего равенства с учетом соотношения $\lambda = a c p$ получаем расчетную формулу

$$\lambda = \frac{[K_T \vartheta_T(\tau) + C_{\Sigma} b] h}{S \vartheta_0(\tau)}, \quad (8)$$

где $C_{\Sigma} = C_{\Pi} + 0,5 C_T + 0,16 C$.

Если теплопередача между блоками, в основном, осуществляется через образец, а теплообмен блоков со средой относительно мал, можно получить соотношение

$$K_T \vartheta_T(\tau) = C_{\text{бл.}} b,$$

с учетом которого формула (8) преобразуется:

$$\lambda = \frac{K_T h}{S} \frac{\vartheta_T(\tau)}{\vartheta_0(\tau)} \left(1 + \frac{C_{\Sigma}}{C_{\text{бл.}}} \right). \quad (9)$$

Если в выражениях (8) и (9)

$$K_T \vartheta_T \gg C_{\Sigma} b \quad \text{или} \quad \frac{C_{\Sigma}}{C_{\text{бл}}} \ll 1, \quad (10)$$

то из исходных соотношений получаем рабочую расчетную формулу (9). Соотношение (10) необходимо учитывать при проектировании калориметра.

Проведем оценку погрешности измерения теплопроводности за счет неучтенного теплового теплообмена образца со средой.

Теплоизоляция боковой поверхности образца осуществляется за счет кольцевой прослойки (рис.4), образуемой прилегающими к образцу поверхностями блоков. Прослойка может быть заполнена воздухом, или эффективной теплоизоляцией, например, поролоном или пенопластом.

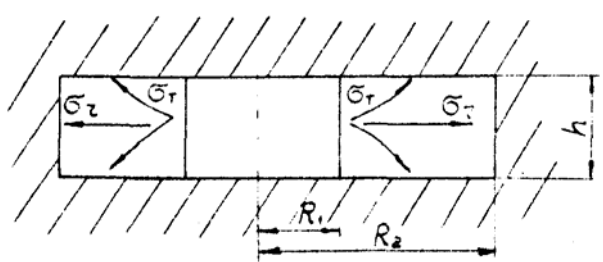


Рис.4. Теплообмен в кольцевой прослойке

Погрешность за счет бокового теплообмена образца может быть определена соотношением

$$\delta(Q_{\text{рас}}) = \frac{Q_{\text{рас}}}{Q_T} = \frac{Q_{\text{рас}}}{K_T \vartheta_T}.$$

Поток рассеяния с боковой поверхности образца $Q_{\text{рас}}$ определяется алгебраической суммой потоков к нижней и верхней торцевым и к внешней кольцевой поверхностям прослойки

$$Q_{\text{рас}} = \sigma_T (t_2 - \bar{t}_{\text{обр}}) + \sigma_T (t_1 - \bar{t}_{\text{обр}}) + \sigma_2 (\bar{t}_{\text{бл}} - \bar{t}_{\text{обр}}).$$

Тепловые проводимости σ_T и σ_2 известны.

С учетом того, что $t_2 - t_1 = \vartheta_0 - \vartheta_T$; $\bar{t}_{обp} = t_2 - 0,5\vartheta_0$; $\bar{t}_{дл} = 0,5(t_2 + t_1)$, получаем величину искомой погрешности

$$\delta(Q_{рас}) = -\frac{(\sigma_T + 0,5\sigma_2)\vartheta_T}{K_T \vartheta_T} = -\frac{\sigma_T + 0,5\sigma_2}{K_T}. \quad (11)$$

Анализ зависимости $\frac{\sigma_2}{\lambda R_1} = f(\bar{H}_1, \bar{R}_2)$ показывает, что при соотношении размеров $\frac{h}{R_1} > 0,5$ и $\frac{R_2}{R_1} \geq 3$ проводимость $\sigma_2 = 0$ и поток рассеяния определяется лишь несимметричностью теплообмена боковой поверхности образца с прилегающими торцевыми поверхностями кольцевой прослойки

$$\delta(Q_{рас}) = -\frac{\sigma_T}{K_T}. \quad (12)$$

Полученный результат интересен тем, что рассматриваемая погрешность не зависит от теплового сопротивления исследуемого образца (при постоянной высоте h) и определяется только геометрическими размерами самого калориметра.

Описание прибора

Корпус прибора состоит из двух поперечных рам, на которые крепится верхняя плита, откидная передняя панель и обшивки из тонкой листовой стали. На верхней плите установлен калориметр. Он открывается при помощи подъемного механизма, рычаг которого расположен на правой стороне корпуса. На передней панели прибора размещаются рукоятки управления.

Для определения температуры отнесения в блоке калориметров устанавливается термометр. Внутри корпуса прибора расположены силовой трансформатор и блок холодных спаев.

Калориметрическое устройство (рис.5) состоит из двух массивных блоков: нижнего 1 и верхнего 2. Нижний блок жестко крепится к верхней панели 3, а верхний блок с помощью шпилек 4 свободно подвешивается в проушине 5 штанги 6. Сверху блок 2, проушина и штанга закрываются декоративным кожухом 7. Штанга вместе с верхним блоком с помощью рычага 8 поднимается вверх, обеспечивая доступ к контактным

поверхностям калориметра. Контактные поверхности блоков притерты. В верхнем блоке непосредственно у контактной поверхности расположена термопара T_1 , которая выводится сначала вверх по блоку, а затем через полую штангу к блоку холодных спаев. Термопара заделывается в блоке эпоксидной смолой.

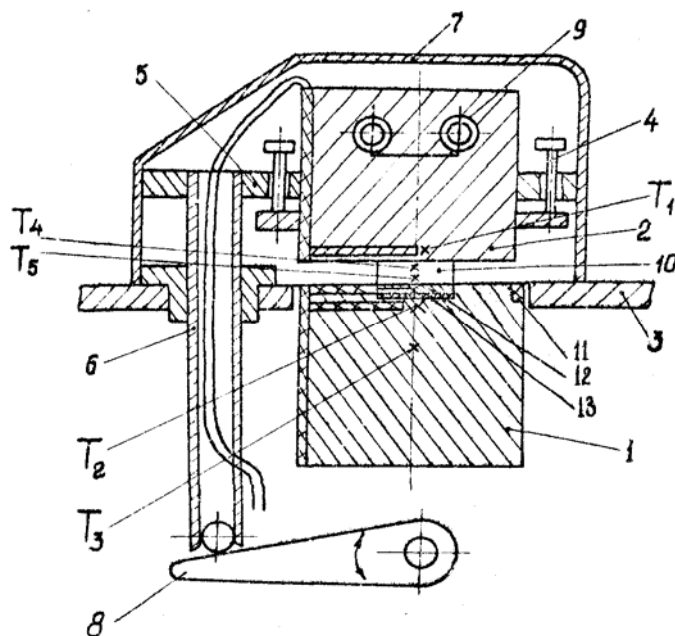


Рис.5. Конструкция калориметрического устройства

В нижнем блоке монтируется тепломер, который состоит из контактной медной пластинки 12 толщиной 2 мм и рабочего слоя 13 толщиной 0,3 мм из эпоксидной смолы. В пластинке 12 просверлено 5 радиальных отверстий, в которые монтируются спаи термопары T_2 тепломера, другие 5 спаев монтируются в радиальных отверстиях нижнего блока вблизи рабочего слоя тепломера. Из пластинки тепломера термопары выводятся через радиальные канавки в кольцевую проточку 11. Соединение спаев термопары тепломера проводится в кольцевой проточке, после чего радиальные канавки проточки заливаются эпоксидной смолой. В нижнем блоке монтируется термопара T_3 . Термопара T_4 и T_5 соединяются дифференциально и служат для измерения перепада температуры на образце. Обе термопары могут перемещаться в пределах нескольких миллиметров по высоте. Термопары армированы хлорвиниловыми трубочками. На боковой поверхности верхнего блока у контактной пластины крепится охранное кольцо, перекрывающее зазор между блоками, но не касающееся нижнего блока.

В верхнем блоке расположен спиральный нагреватель 9 для подогрева блока. Нагреватель выводится на переднюю колодку на верхнем торце блока. Питание нагревателя $U=12$ В.

Порядок подготовки и проведения опыта

1. Включить тумблер K_1 , при этом напряжение сети (220 В, 50 Гц) подается на трансформатор, загорается сигнальная лампочка Л.
2. Открыть верхний колпак калориметра. В положении переключателя Π_1 «Уст. нуля» установить механически нуль на тридцать делений влево от нуля шкалы гальванометра.
3. В положении переключателя Π_1 и « N_0 » нажать кнопку «Нагрев», вывести световой указатель гальванометра в зону 80-100 дел.
4. Контактные поверхности блоков и исследуемого образца протереть бензином или спиртом и смазать тонким слоем масла.
5. Вставить термопары в образец, установить образец строго по центру пластинки и закрыть калориметр.
6. Переключатель Π_1 перевести в положение « N_T » и после установления стационарного состояния снять последовательно показания N_T и N_0 в положении переключателя « N_0 ».
7. Открыть калориметр и, нажав кнопку K_4 , проверить величину перегрева блоков.
8. Рассчитать теплопроводность по формуле, выгравированной на пульте управления.

Контрольные вопросы

1. Какой метод реализован в приборе ТФП-3?
2. Почему термопары вставляются в образец?
3. Почему в приборе поправкой на боковой теплообмен пренебрегают?
4. Почему теплоемкость блоков на много больше теплоемкости образца?
5. Какие материалы можно исследовать на приборе ТФП-3?
6. Почему в процессе измерения отключается основной нагреватель?
7. Возможно ли проведение измерений теплопроводности теплоизоляционных материалов на приборе ТФП-3?
8. Какова погрешность измерений коэффициента теплопроводности?
9. Каков порядок величин коэффициента теплопроводности металлов, неметаллических жидкостей, полимеров, пеноматериалов?

Литература

1. Курепин В.В., Бегункова А.Ф. Сравнительный метод измерения теплопроводности. ИФЖ, 1975, т.29, №4.
2. Тайц Н.В. Технология нагрева стали - М.: Металлургия, 1950.
3. Курепин В.В. Учет бокового теплообмена при испытании образцов в форме ограниченного цилиндра. В сб. Тепло - и массоперенос. - Минск.: Наука и техника, 1968, т. 7.

Лабораторная работа № 3

Исследование коэффициентов теплопроводности неметаллических материалов

Цель работы – ознакомление с экспериментальным методом определения коэффициента теплопроводности неметаллических материалов (компаунды, керамика, теплоизоляторы и т.д.).

На измерителе теплопроводности ИТ- λ -400 проводится измерение теплопроводности материалов в диапазоне температур от -100 до $+400^{\circ}\text{C}$.

Задание к работе

1. Ознакомиться с теорией экспериментального метода определения коэффициента теплопроводности.
2. Ознакомиться с описанием λ -калориметра.
3. Провести измерения $\lambda(t)$ образцов по указанию преподавателя (расчет и измерения коэффициента теплопроводности проводятся для одних и тех же образцов).
4. Сопоставить расчетные и экспериментальные значения коэффициента теплопроводности исследуемого материала, дать анализ расхождения между ними.
5. В отчете изложить метод экспериментального определения коэффициентов теплопроводности материалов, представить принципиальную схему λ -калориметра, таблицу опытных данных с расчетами, а также результаты сопоставления расчета и измерения.

Теория метода измерения

По своему внешнему оформлению и некоторым физическим предпосылкам динамические λ -калориметры напоминают бикалориметры регулярного режима первого рода. Так, в них в качестве основных элементов калориметра участвуют два тела: металлическое ядро с известной теплоемкостью $C_{\text{я}}$ и испытуемый слой, полностью или частично окружающий ядро. Причем как и прежде, предусматривается, чтобы ядро имело тепловую связь с наружной средой только через испытуемый слой, а теплоемкость слоя C была бы малой по сравнению с теплоемкостью ядра $C_{\text{я}}$.

Однако по режиму опыта динамические λ -калориметры существенно отличаются от бикалориметров регулярного режима первого рода.

Наружная поверхность испытуемого слоя соприкасается со средой и получает от нее тепло. Величина и длительность действия теплового потока, поступающего к слою от среды, таковы, что под его воздействием ядро и испытуемый слой за время опыта успевают повысить свою температуру в

широком диапазоне. Перепад температуры в слое $\vartheta(\tau)$ в опыте зависит от теплового сопротивления слоя $R(t)$, теплоемкости ядра $C_{\text{я}}(t)$, слоя $C(t)$ и скоростей их разогрева $b_{\text{я}}(\tau)$, $b(\tau)$.

Монотонный разогрев системы может реализовываться различными способами. Так, разогрев может обеспечить конвективная среда, температура которой в опыте принудительно повышается с заданной скоростью $b_{\text{с}}(\tau)$, либо плотно примыкающая к слою металлическая оболочка с равномерным полем либо можно поместить систему в предварительно нагретую до высокой температуры печь.

Оптимально спроектированные λ -калориметры монотонного разогрева, в целях упрощения расчетных формул и повышения точности измерений, должны удовлетворять определенным общим требованиям. В частности, на их конструкцию и режим опыта целесообразно накладывать следующие ограничения:

1) суммарная теплоемкость испытуемого слоя $C(t)$ должна составлять не более 20% от теплоемкости ядра $C_{\text{я}}(t)$:

$$C < 0,2 C_{\text{я}};$$

2) теплопроводность испытуемого слоя $\lambda(t)$ составляет не более 10% от теплопроводности ядра $\lambda_{\text{я}}(t)$:

$$\lambda < 0,1 \lambda_{\text{я}};$$

3) толщина слоя δ мала по сравнению с его двумя другими размерами, так что выполняется неравенство $2(F_{\text{нар.}} - F_{\text{вн.}})/(F_{\text{нар.}} + F_{\text{вн.}}) < 0,1$;

4) тепловое сопротивление слоя R по крайней мере раз в 5-10 превышает контактные тепловые сопротивления $2R_{\text{к}}$ слоя на границах с ядром и внешней оболочкой (если таковая имеется) $R > (5 - 10) \cdot 2R_{\text{к}}$;

5) разогрев ядра и слоя производится со слабо меняющейся на протяжении опыта скоростью;

6) перепад температуры по толщине слоя $\vartheta(\tau)$ в опыте остается небольшим, порядка $\vartheta(\tau) < (10 - 30) \text{ К}$.

Перечисленные ограничения позволяют, в свою очередь, сделать ряд допущений, которые дают возможность упростить задачу теплового анализа системы «ядро – испытуемый слой»:

1) наибольшие возможные перепады температуры в ядре малы по сравнению с перепадом $\vartheta(\tau)$ в испытуемом слое;

2) скорость разогрева ядра $b_{\text{я}}(\tau)$ остается практически одинаковой во всех его точках;

3) средняя объемная скорость разогрева слоя $b_{\text{в}}(\tau)$ близка к скорости разогрева ядра $b_{\text{я}}(\tau)$, в частности, между ними соблюдается неравенство;

4) испытуемый слой в тепловом отношении может быть уподоблен тонкой пластинке с одномерным близким к стационарному температурным полем $\vartheta(x, \tau) = t(x, \tau) - t_{\text{я}}(\tau)$;

5) теплофизические свойства слоя в пределах перепада температуры $\vartheta(\tau)$ могут считаться постоянными, не зависящими от температуры.

Рассмотрим неограниченную пластину толщиной $-l < x < l$ с началом координат в середине пластины, которая монотонно разогревается (охлаждается) одномерным тепловым потоком, нормальным к ее граням. Внутренние тепловые источники отсутствуют.

Теплофизические параметры образца являются функциями температуры: $\lambda = \lambda(t)$, $a = a(t)$, $c = c(t)$, $\gamma = \gamma(t)$.

Уравнение Фурье для одномерного теплового потока при переменных теплофизических параметрах имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) = c \gamma b, \text{ где } b = \frac{\partial t}{\partial \tau}. \quad (1)$$

Граничные условия первого рода:

$$\vartheta(0, \tau) = 0; \quad \vartheta(l, \tau) - \vartheta(-l, \tau) = \vartheta_{l,-l}, \quad (2)$$

где $\vartheta(x, \tau) = t(x, \tau) - t(0, \tau)$.

Уравнение (1) является нелинейным, найти его точное решение не представляется возможным.

Поскольку решение поставленной задачи предполагается использовать для теплофизических измерений, воспользуемся тем обстоятельством, что измерения обычно проводятся при малых перепадах температур в образце. Это позволяет представить параметры λ , a , c , γ и b на участках, соизмеримых с перепадом температуры внутри образца, линейными функциями температуры:

$$j = j(1 + k_j \vartheta), \quad (j = \lambda, a, c, \gamma, b), \quad (3)$$

где $k_j = \frac{1}{j_0} \left(\frac{\partial j}{\partial \vartheta} \right)_0$ – относительные температурные коэффициенты изменения соответствующих параметров, являющихся функцией базовой температуры в пластине, $t_0 = t(0, \tau)$, но не зависящих от перепада ϑ .

Коэффициент $k_{b,x} = \frac{1}{b_0} \left(\frac{db}{d\vartheta} \right)_0$ определяет распределение скорости $b(x, \tau)$ по координате x и непосредственно связан с коэффициентом $k_{b,\tau} = \frac{1}{b_0} \left(\frac{db}{dt_0} \right)_\tau$, характеризующим нелинейность разогрева образца во времени соотношением

$$k_{b,x} = k_{b,\tau} - k_a. \quad (4)$$

Дополнительно введем ограничения

$$|k_j \vartheta| \leq 0,1, (j = \lambda, a, c, \gamma, b). \quad (5)$$

Анализ имеющихся экспериментальных данных для различных групп материалов позволяет считать, что ограничения (5) легко выполняются, так как при теплофизических испытаниях перепады в образце обычно поддерживают в пределах 10-50 К.

С учетом принятых предпосылок (3) и (5) уравнение (1) можно преобразовать к виду

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_0 (1 + k_\lambda \vartheta) \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right] = c_0 \gamma_0 b_0 [1 + (k_c + k_\gamma) \vartheta] (1 + k_{b,x} \vartheta). \quad (6)$$

С учетом соотношений между относительными коэффициентами $k_\lambda = k_a + k_c + k_\gamma$ и $k_{b,x} = k_{b,\tau} - k_a$ уравнение (6) с точностью до членов второго порядка малости удается заменить более простым:

$$\frac{d^2 \vartheta}{dx^2} = \frac{b_0}{a_0} + \left[\frac{b_0}{a_0} (k_{b,\tau} - 2k_a) \vartheta - k_\lambda \left(\frac{d\vartheta}{dx} \right)^2 \right]. \quad (7)$$

На основании решения уравнения (7) способом последовательных приближений (с погрешностью не более 0,5%) получим функцию вида

$$\vartheta(x, \tau) = \frac{\vartheta_{l,-l}}{2l} x + \frac{b_0}{a_0} x^2 + \Delta \vartheta(x, \tau), \quad (8)$$

$$\text{где } \Delta \vartheta(x, \tau) = \frac{1}{3} (2k_\lambda - 2k_a - k_{b,\tau}) \frac{b_0}{2a_0} \left[\frac{\vartheta_{l,-l}}{2l} (l^2 - x^2) x - \frac{b_0}{a_0} \frac{x^4}{2} \right] - \frac{1}{2} k_\lambda \left(\frac{\vartheta_{l,-l}}{2l} \right)^2 x^2.$$

Если поправка $\Delta \vartheta(x, \tau)$ в выражении (8) пренебрежимо мала, то температурное поле пластины в условиях монотонного разогрева подчиняется простейшей зависимости, совпадающей с известным соотношением *квазистационарного режима*.

Поскольку структура поправки громоздка и дополнительно нужно знать коэффициенты k_j для исследуемого материала и режима опыта, то целесообразно выбрать такой режим, чтобы поправка $\Delta \vartheta(x, \tau)$ была пренебрежимо мала, а расчетные формулы совпадали с использованными в квазистационарном режиме.

Измерение коэффициента теплопроводности в режиме монотонного разогрева тонкой пластины сводится к измерению теплового потока и истинного градиента температуры в основном слое пластины.

Основным будем называть слой пластины, в котором *градиент температуры совпадает со средним градиентом температуры на пластине:*

$$\left(\frac{\partial \vartheta}{\partial x}\right)_{осн} = \frac{\vartheta_{l,-l}}{2l}. \quad (9)$$

Если температурное поле пластины подчиняется закономерностям регулярного режима второго рода, то температурное поле в образце описывается параболой, и основной слой совпадает с центральным.

При отклонении режима разогрева от регулярного режима второго рода основной слой может смещаться на величину x_0 .

Точное решение уравнения (8) дает возможность получить выражение для смещения основного слоя относительно среднего. Анализ показывает, что выражение для смещения x_0 является сложной функцией многих параметров $(l, \vartheta_{l,-l}, b_0, a_0, k_\lambda, k_0, k_{b,\tau})$.

Поэтому решение (8) целесообразно использовать только на этапе проектирования при выборе режима опыта и параметров таким образом, чтобы смещение основного слоя было пренебрежимо малым, и *вместо него можно было бы рассматривать средний слой пластины*. Такое условие можно найти, если градиент температуры в среднем слое пластины $\frac{d\vartheta(0,\tau)}{dx}$ сопоставить со средним градиентом $\frac{\vartheta_{l,-l}}{2l}$ и определить расхождение между ними допустимой величиной, например, $\eta = 0,5\%$.

$$\left| \frac{d\vartheta(0,\tau)}{dx} - \frac{\vartheta_{l,-l}}{2l} \right| \leq 0,005 \frac{\vartheta_{l,-l}}{2l}. \quad (10)$$

Подстановка производной $\frac{d\vartheta(0,\tau)}{2x}$ от точного решения (8) в (10) дает соотношение для выбора параметров:

$$\left| \frac{1}{3}(2k_\lambda + 2k_a - k_{b,\tau}) \frac{b_0}{2a_0} l^2 \right| \leq 0,005. \quad (11)$$

При выполнении условия (11) основной слой удастся заменить средним слоем образца, в результате чего расчетная формула метода значительно упрощается.

Расчеты показывают, что при выполнении условия (11) проходящий через образец поток $Q_0(\tau)$ в несколько раз больше потока, поглощаемого образцом $Q_{\text{погл.}}(\tau)$, т.е. $Q_0(\tau) \geq 5Q_0(\tau)$.

Устройство и принцип работы ИТ-λ– 400

Тепловая схема метода показана на рис.6.

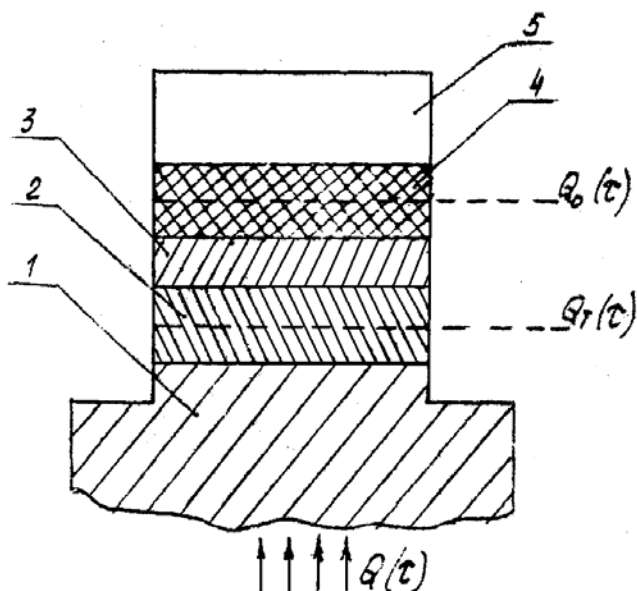


Рис.6. Тепловая схема λ-калориметра

Образец испытываемый 4, пластина контактная 3 и стержень 5 монотонно разогреваются тепловым потоком $Q(\tau)$, поступающим от основания 1. Боковые поверхности стержня 5, образца 4, а также пластины 2 и 3 адиабатически изолированы. Стержень 5 и пластина контактная 3 изготовлены из меди, обладающей высокой теплопроводностью, поэтому перепады температур на них незначительны. Тепловой поток $Q(\tau)$, проходящий через среднее сечение пластины 2, частично

поглощается ею, и далее идет на разогрев пластины 3, образца 4 и стержня 5. Размеры системы выбраны так, чтобы потоки, аккумулируемые образцом и пластиной, были по крайней мере в 5 – 10 раз меньше поглощаемых стержнем.

В этом случае температурное поле образца 4 и пластины 2 оказывается близким к линейному, стационарному, все детали системы разогреваются с близкими скоростями, а для тепловых потоков $Q_0(\tau)$ и $Q_T(\tau)$ для любого уровня температуры справедливы формулы:

$$Q_0(\tau) = \frac{\vartheta_0 \cdot S}{R} = (0.5 \cdot C_0 + C_C) \cdot b, \quad (12)$$

где $Q_0(\tau)$ — тепловой поток, проходящий через образец и поглощаемый стержнем, Вт; ϑ_0 — перепад температуры на образце, К; R — тепловое сопротивление между стержнем и контактной пластиной, $(\text{м}^2 \text{К})/\text{Вт}$; C_0 — полная теплоемкость образца, Дж/К; C_C — полная теплоемкость стержня, Дж/К; b — скорость разогрева измерительной ячейки, К/с; S — площадь поперечного сечения образца, м^2 .

$$Q_T(\tau) = K_T^* \cdot \vartheta_T = (0.5C_T + C_{II} + C_0 + C_C) \cdot b, \quad (13)$$

где $Q_T(\tau)$ — тепловой поток, проходящий через среднее сечение пластины 2, Вт; K_T^* — коэффициент пропорциональности, характеризующий эффективную тепловую проводимость пластины 2, Вт/К; ϑ_T — перепад температуры на пластине 2, К; C_T — полная теплоемкость пластины 2, Дж/К; C_{II} — полная теплоемкость пластины контактной 3, Дж/К.

Тепловое сопротивление между стержнем и контактной пластиной определяется по формуле:

$$R = R_0 + R_K, \quad (14)$$

где R_0 — тепловое сопротивление образца, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$; R_K — поправка, учитывающая тепловое сопротивление контакта, неидентичность и тепловое сопротивление заделки термопар, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$.

Тепловое сопротивление образца определяется по формуле:

$$R_0 = \frac{h}{\lambda}, \quad (15)$$

где h — высота образца, м; λ — теплопроводность образца, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

На основании формул (12), (13), (14), (15) получены рабочие расчетные формулы для теплового сопротивления образца и его теплопроводности:

$$P_0 = \frac{\vartheta_0 \cdot S(1 + \sigma_c)}{\vartheta_T \cdot K_T^*} - P_K, \quad (16)$$

где σ_c — поправка, учитывающая теплоемкость образца.

$$\sigma_c = \frac{C_0}{2(C_0 + C_c)}, \quad (17)$$

где C_0 — полная теплоемкость испытуемого образца, Дж/К; C_c — полная теплоемкость стержня, Дж/К;

$$C_0 = C_0(t) \cdot m_0, \quad (18)$$

где $C_0(t)$ — ориентировочное значение удельной теплоемкости образца, Дж/(кг К); m_0 — масса образца, кг;

$$C_c = C_M(t) \cdot m_c, \quad (19)$$

где $C_M(t)$ — удельная теплоемкость меди, Дж/(кг. К); m_c — масса стержня, кг.

Влияние σ_c обычно не превышает 5 – 10% и может оцениваться по ориентировочным данным теплоемкости образца.

Значение тепловой проводимости пластины определяется по следующей формуле:

$$K_T = K_T^* \cdot \frac{C_c}{0.5 \cdot C_T + C_{II} + C_c}, \quad (20)$$

Значение теплопроводности определяется по следующей формуле:

$$\lambda = \frac{h}{R_0}. \quad (21)$$

Вычисленные значения теплопроводности образца следует относить к средней температуре образца, которая определяется по формуле:

$$\bar{t} = t_c + 0.5 \cdot A_t \cdot \Pi_0, \quad (22)$$

где $\bar{t}$ - средняя температура образца, $^{\circ}\text{C}$; t_c - температура, при которой проводилось измерение теплопроводности, $^{\circ}\text{C}$; A_t - чувствительность термопары хромель–алюмель, К/мВ; Π_0 -перепад температуры на образце, мВ.

Параметры K_T и R_K не зависят от свойств испытуемого образца, являются “постоянными” измерителя. Значение R_K обычно не превышает 10 – 20% теплового сопротивления образца.

Определение K_T и R_K проводится в градуировочных экспериментах с образцовой мерой из кварцевого стекла и образцом из меди. Для определения теплопроводности испытуемого образца в эксперименте необходимо на различных уровнях температуры измерять перепады температуры на тепломере ϑ_T и образце ϑ_0 в микровольтах, мкВ, Π_T и Π_0 .

Работа измерителя

Измеритель теплопроводности предназначен для массовых исследований теплофизических свойств, поэтому в его основу положен режим монотонного нагрева, позволяющий из одного эксперимента получить сразу температурную зависимость изучаемого параметра и обеспечить высокую производительность.

Блок питания и регулирования обеспечивает нагрев ядра измерительной ячейки со средней скоростью около 0,1 К/с и автоматическое регулирование температуры. Скорость разогрева определяется величиной начального напряжения на нагревателе и скоростью его изменения.

Обе эти величины строго фиксированы. Источником регулируемого напряжения служит лабораторный автотрансформатор с электродвигателем и редуктором. Для определения теплопроводности в эксперименте в процессе непрерывного разогрева на фиксированных уровнях температуры с помощью прибора В7 – 21 (в микровольтах) измеряется перепад температуры на образце Π_0 и пластине Π_T тепломера.

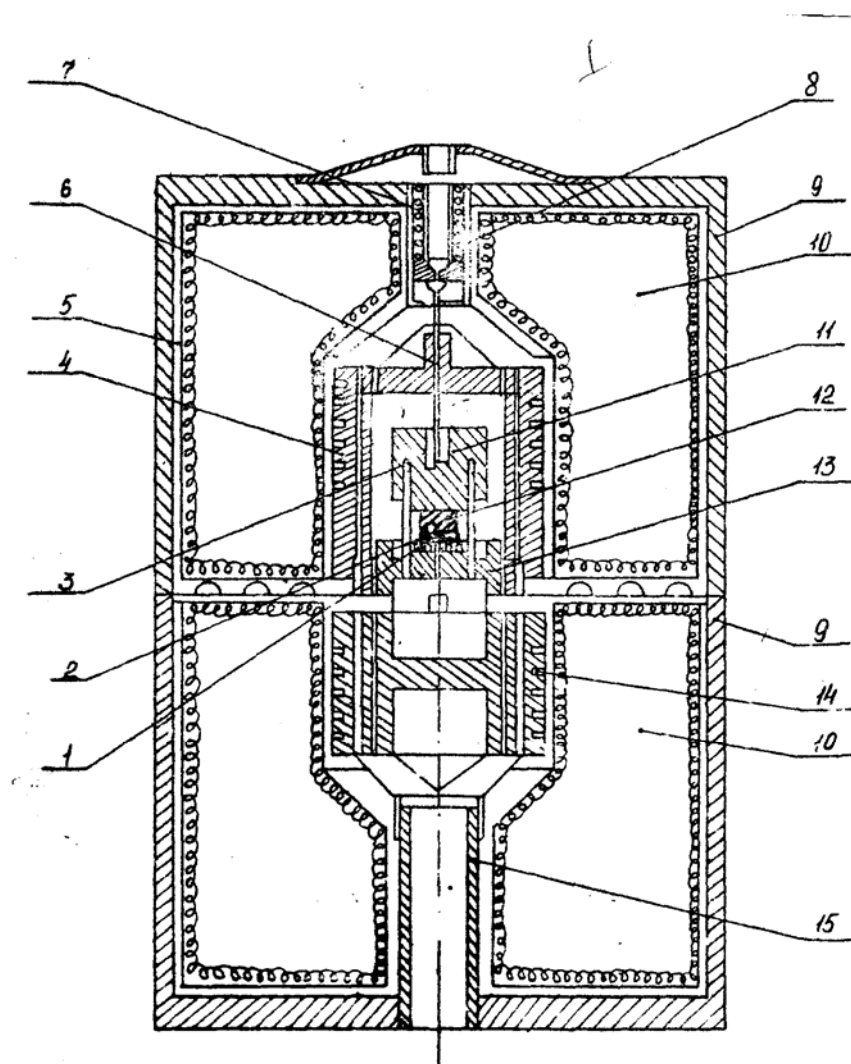


Рис.7.Конструкция λ – калориметра

- 1.Пластина. 2.Пластина контактная. 3.Термопара. 4.Колпак охранный.
- 5.Коробка из фольги. 6.Прижим. 7.Пружина. 8.Патрубок. 9.Корпус.
- 10.Оболочка теплозащитная. 11.Стержень. 12.Образец
- испытываемый. 13.Основание. 14.Блок нагревательный. 15.Патрубок.

Градуировка измерителя

Градуировка измерителя заключается в экспериментальном определении тепловой проводимости тепломера K_T и поправки R_K , учитывающей контактное сопротивление образца и заделки термопар, динамические погрешности и неидентичность градуировки термопар.

Определение тепловой проводимости тепломера.

При определении K_T проводят серию экспериментов, в которых в качестве образца используют образцовую меру теплопроводности из плавленого кварца марки КВ ГОСТ 15130 – 69. Экспериментальные данные заносятся в таблицу 2. Расчет K_T проводится без учета поправки R_K по формуле:

$$K_T = \frac{\Pi_0}{\Pi_T} \frac{\lambda}{h} S (1 + \sigma_c), \quad (23)$$

где Π_0 — перепад температуры на образце, мКВ; Π_T — перепад температуры на рабочем слое тепломера, мКВ.

Определение теплового сопротивления.

При определении R_K проводят серию экспериментов с образцом из меди. Экспериментальные данные заносят в таблицу 2. Расчет R_K проводят по формуле:

$$R_K = \frac{\Pi_0}{\Pi_T} \frac{S}{K_T} (1 + \sigma_c) - \frac{h_M}{\lambda_M}, \quad (24)$$

где λ_M — теплопроводность медного образца, Вт/(м·К); h_M — высота медного образца, м.

Значения теплопроводности λ_M в зависимости от температуры представлены в литературе.

Проводят уточненный расчет K_T с учетом среднего значения R_K по формуле:

$$K_T^* = \frac{\Pi_0}{\Pi_T} \frac{\lambda}{h} S (1 - \sigma_K + \sigma_c), \quad (25)$$

где λ — теплопроводность кварцевого стекла марки КВ, Вт/(м·К); h — высота образца из кварцевого стекла марки КВ, м; S — площадь поперечного сечения образца, м²; σ_c — поправка, учитывающая теплоемкость образца из кварца марки КВ; σ_K — поправка, учитывающая тепловое сопротивление R_K .

$$\sigma_K = R_K \frac{\lambda}{h}. \quad (26)$$

Среднее из вычисленных значений K_T используют при дальнейшей работе.

Расчет погрешностей определения K_T и R_K .

Погрешности определения K_T и R_K являются случайными. Величина их зависит от квалификации экспериментатора и не должна превышать соответственно 5% и 10%.

Значения погрешностей нормированы, исходя из расчетной величины погрешности прибора ($\pm 10\%$) во всем диапазоне значений теплопроводности. Расчет погрешности определения K_T проводится по формулам:

$$\Delta^0(\bar{K}_T) = \frac{t_P \sigma_{KT}}{\bar{K}_T}, \quad (27)$$

где $\Delta^0(\bar{K}_T)$ - случайная погрешность определения тепловой проводимости тепломера; t_P - коэффициент Стьюдента (для $\Pi=5$ $t_P=2,78$ при доверительной поверхности $P=0,95$).

$$\tilde{\sigma}_{\bar{K}_T} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_{T_i} - \bar{K}_T)^2}{n(n-1)}}, \quad (28)$$

где $\tilde{\sigma}_{\bar{K}_T}$ - среднеквадратичное отклонение тепловой проводимости тепломера, Вт/К; n - число измерений.

$$\bar{K}_T = \frac{\sum_{i=1}^5 K_{T_i}}{5}, \quad (29)$$

где $\bar{K}_T$ - среднее значение проводимости тепломера, Вт/К.

Расчет погрешности определения R_K проводится по формулам:

$$\Delta^0(\bar{R}_K) = \frac{t_P \tilde{\sigma}_{\bar{R}_K}}{\bar{R}_K}, \quad (30)$$

где $\Delta^0(\bar{R}_K)$ - случайная погрешность определения поправки на контактное тепловое сопротивление образца, неидентичность и заделку термопар.

$$\tilde{\sigma}_{\bar{R}_K} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_{K_i} - \bar{R}_K)^2}{n(n-1)}}, \quad (31)$$

где $\tilde{\sigma}_{\bar{R}_K}$ - среднеквадратическое отклонение поправки на контактное тепловое сопротивление образца, неидентичность и заделку термопар.

$$\bar{R}_K = \frac{\sum_{i=1}^5 R_{K_i}}{5}, \quad (32)$$

где $\bar{R}_K$ - среднее значение поправки на контактное тепловое сопротивление образца, неидентичность и заделку термопар, (м²·К)/Вт.

Подготовка к работе

1. Соединить блок питания и регулирования с измерительным блоком жгутом, прибор Ф136 с измерительным блоком шнуром.
2. Переведите кнопки СЕТЬ, НАГРЕВ в положение ВЫКЛ.
3. Подключите блок питания и регулирования и прибор Ф136 к сети 220В, 50 Гц.
4. Установите:
переключатель ИЗМЕРЕНИЕ в положение УСТ, 0;
переключатель ТЕМПЕРАТУРА в положение 25⁰С.
5. Произвести подготовку микровольтнаноамперметра Ф136 к работе согласно инструкции по эксплуатации на прибор Ф136.
6. Замерить высоту и диаметр с погрешностью $\pm 0,01$ мм.
7. Взвесьте образец с погрешностью $\pm 0,001$ г.
8. Занесите полученные об образце данные в табл. 2.
9. Поднимите верхнюю половину корпуса измерительной ячейки.
10. Протрите бензином ГОСТ8505-57 и нанесите тонкий слой смазки ПФМС-4 ТУ6-02-917-74 на контактные поверхности стержня, образца, контактной пластины тепломера.
11. Образец установите на контактную пластину тепломера, стержень – на иглы термопары.
12. Опустите верхнюю половину корпуса измерительной ячейки.
13. Включить блок питания и регулирования кнопкой СЕТЬ.
14. Установите по вольтметру начальное напряжение 40В при работе от 25⁰С и 20 В при работе от минус 100⁰С.

Порядок проведения эксперимента

1. Установите переключатель ИЗМЕРЕНИЕ в положение t_C .
2. Проведите охлаждение измерительной ячейки (при работе от минус 100°C), для чего:
 - налейте в бачок устройства для охлаждения жидкий азот из транспортировочного сосуда Дьюара (тип АСД- 16ГОСТ 16024-70);
 - установите бачок на верхний колпак измерительного блока.
3. Следите по прибору Ф136 в процессе охлаждения за температурой измерительной ячейки, последовательно (от $+25$ до -125°C), переводя переключение рукояткой ТЕМПЕРАТУРА.
4. Снимите бачок с колпака измерительного блока через 2-3 минуты после достижения температуры минус 125°C .
5. Включите кнопкой НАГРЕВ основной нагреватель.
6. Снимите показания прибора Ф136 P_0 и P_t , при достижении каждой из температур, указанных в табл.2 (температура стержня достигает ожидаемого значения при прохождении светового указателя прибора Ф136 через нулевую отметку), проводя переключение рукояткой переключателя ИЗМЕРЕНИЕ, занесите значения P_0 и P_t в табл.2 и переведите переключатель ИЗМЕРЕНИЕ в положение t_C .
7. Выключите кнопкой НАГРЕВ основной нагреватель при достижении верхнего уровня температуры испытаний.
8. Установите переключатель ИЗМЕРЕНИЕ в положение УСТ.0.
9. Зааретируйте прибор Ф136.
10. Проведите охлаждение ячейки до комнатной температуры.
11. Включите блок питания и регулирования.
12. Проведите расчет теплопроводности в следующей последовательности:
 - рассчитайте поправку на теплоемкость образца σ по формуле (17);
 - рассчитайте тепловое сопротивление образца R_0 по формуле (16);
 - рассчитайте теплопроводность испытуемого образца λ по формуле (21);
 - рассчитайте температуру отнесения измерительного значения теплопроводности $\bar{t}$ формуле (22);

Контрольные вопросы

1. Каков порядок величины теплоемкости и теплопроводности имеют материалы: стекло, резина, текстолит, эбонит, картон, гранит, бетон, неметаллические жидкости, металлы, волокнистые материалы?
2. Каков ожидаемый характер зависимости $c(t)$ и $\lambda(t)$ исследуемых образцов?
3. Сколькими значащими цифрами записывается результат измерения?
4. Основные допущения и ограничения в теории регулярного режима второго рода (квазистационарный режим).
5. Основные допущения и ограничения в теории монотонного нагрева.

6. Теория монотонного режима работает при линейном изменении коэффициентов от температуры или при любом монотонном?
7. Каково соотношение C_C и C_0 в приборе? Почему?
8. Как измеряется в приборе тепловой поток, проходящий через образец?
9. Значительно ли меняется скорость нагрева в процессе опыта?
10. Как осуществляется теплоизоляция стержня?
11. Чем регулируется температура оболочки?
12. Зависит ли тепловой поток, проходящий через образец, от его теплового сопротивления?
13. Где монтируются термодатчики, что они измеряют?
14. Существует ли теплообмен на боковой поверхности образца, его направление?
15. Влияет ли на результат измерения смещение образца относительно центра основания? Если влияет, то как изменяется результат?
16. В какую сторону выгибается образец при нагреве снизу, как влияет на результат прогиб образца?
17. Допускается ли, чтобы образец впитывал контактную смазку?

Литература

1. Платунов Е.С. Теплофизические измерения в монотонном режиме. «Энергия», 1973.
2. Кондратьев Г.М. Тепловые измерения. Л., Машгиз, 1957.

Лабораторная работа № 4

Исследование теплопроводности теплоизоляционных материалов

Цель работы – ознакомление с экспериментальным методом определения коэффициента теплопроводности композиционных материалов с хаотическим распределением волокон в объёме (ваты, войлоки, очесы и т.п.) и твёрдых теплоизоляционных пористых материалов (пенополиуретан, поролон, пористые резины, пенобетон, древесно-стружечные плиты и т.п.)

На приборе «Регулярный бикалометр» проводится измерение теплопроводности материалов вблизи комнатных температур.

Программа работы

1. Ознакомиться с теорией метода и прибором для измерения коэффициента теплопроводности.
2. Получить образцы материала для измерения.
3. Провести измерение коэффициента теплопроводности образцов.
4. Сопоставить расчётные и экспериментальные значения теплопроводности исследуемого материала и оценить расхождение.
5. В отчёте изложить метод измерения коэффициента теплопроводности материала, представить схему калориметра, результаты расчёта и измерения, сопоставление полученных результатов с литературными данными для аналогичных материалов.

Теория метода измерения.

Приборы для измерения теплопроводности материалов, в основе работы которых закономерности регулярного режима первого рода, отличаются высокими эксплуатационными и метрологическими возможностями. Особенно удобны они при испытаниях теплоизоляционных материалов, тканей, порошков, волокон, жидкостей и газов вблизи комнатной температуры. Физическая сущность бикалометров регулярного режима сводится к следующему. Массивное металлическое тело (ядро) окружается частично со всех сторон плотно прилегающим к нему тонким слоем из испытуемого материала. Слой обычно выбирается равнотолщинным, а на наружной поверхности его обеспечивается надёжный тепловой контакт с бесконечно активной в тепловом отношении средой, сохраняющей в опыте постоянную температуру и равномерное температурное поле.

Перед началом опыта ядро тем или иным способом перегревается (охлаждается) относительно окружающей среды. После отключения

источника нагрева (охлаждения) ядро свободно охлаждается (нагревается) в термостатируемой среде, причём теплообмен между ядром и средой происходит только через разделяющий их тонким слоем испытуемого материала. Температурное поле в ядре на протяжении всего опыта остаётся равномерным (одна из упрощающих предпосылок).

В соответствии с теорией регулярного теплового режима процесс охлаждения системы «ядро-испытуемый слой» через некоторый отрезок времени после начала опыта регуляризируется, так как все точки системы начнут охлаждаться по экспоненциальному закону

$$\vartheta(x, y, z, \tau) = A \cdot U(x, y, z) \cdot e^{-m\tau},$$

где m - темп регулярного режима, постоянное число для системы; $\vartheta(x, y, z, \tau)$ - перегрев точки $M(x, y, z)$ системы относительно среды.

Темп регулярного охлаждения системы m является функцией теплового сопротивления R испытуемого теплозащитного слоя. Тепловое сопротивление R однозначно связано с коэффициентом теплопроводности λ исследуемого материала. Таким образом, если известна аналитическая связь между темпом m системы и теплопроводностью λ слоя, то для определения λ слоя в опыте достаточно измерить темп охлаждения ядра.

Расчётные отношения бикалориметров получаются достаточно простыми и удобными для использования, если система удовлетворяет нескольким ограничениям, на основании которых могут быть приняты определенные допущения и упрощающие предпосылки. Часть из них является общепринятой в теории регулярного теплового режима:

1. Перегрев ядра относительно среды в опытах должен составлять малую величину, не превышающую $\vartheta_{\text{я}} = 10-20$ К.
2. Теплоёмкость ядра $C_{\text{я}}$ более чем в 3-5 раз должна превышать теплопроводность C_0 испытуемого слоя.
3. Теплопроводность ядра $\lambda_{\text{я}}$ более чем в 10-20 раз должна превышать теплопроводность λ испытуемого слоя.
4. Тепловое сопротивление испытуемого слоя R более чем в 10-20 раз должно превышать величину возможных контактных тепловых сопротивлений на границах слоя с ядром и средой.

Можно сформулировать соответствующие принятым ограничениям упрощающие предпосылки и допущения:

1. Теплофизические свойства ядра и испытуемого слоя, в частности, их теплоёмкость и теплопроводность, являются постоянными числами, не зависящими от перегрева ϑ .
2. Температурное поле ядра остаётся в опыте практически равномерным по сравнению с перепадом температуры ядра $\vartheta_{\text{я}}$ относительно среды.

4. Температура наружной поверхности слоя совпадает с температурой среды, так что выполняется условие $\vartheta_{нар}=0$.

теплопроводности пакетов мягких материалов (мех, ткань) и твёрдых теплоизоляционных материалов при температурах близких к комнатной. Принципиальная схема бикалориметра показана на рис.8. На рис.9 изображена эквивалентная тепловая модель того же калориметра. Образцы 1 помещаются между металлическим ядром 2 и пластинами 3, выполняющими функции бесконечно активной термостатированной протекающей жидкостью среды. Нагреватель 4 служит для перегрева

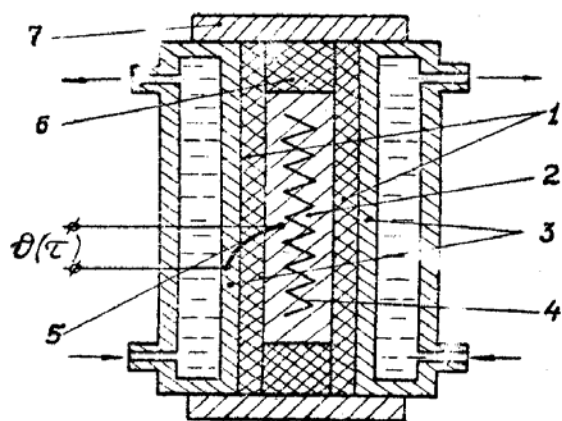


Рис.8. Принципиальная схема бикалориметра

температуры ядра 2 перед опытом на заданное значение ϑ_H , которое фиксируется дифференциальной термопарой 5. Для снижения утечек тепла через боковую (цилиндрическую) поверхность ядра и образцов уменьшают отношение суммарной толщины ядра и испытываемых пластин к диаметру ядра и создают высокоэффективную теплоизоляцию кольцом 6. Таким образом, основная доля потока от ядра проникает в среду через исследуемый слой. Все элементы конструкции калориметра находятся в металлическом корпусе 7.

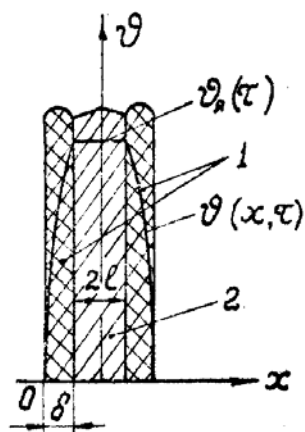


Рис.9.
Эквивалентная
тепловая
модель

Для получения расчётной формулы метода рассмотрим регулярный режим охлаждения трёхсоставной системы «образец-ядро-образец», предполагая наличие в образцах одномерного температурного поля.

В регулярной стадии охлаждения системы «ядро - испытываемые пластины» их температуры перегрева $\vartheta_{\text{я}}$ и $\vartheta(x, \tau)$ должны подчиняться зависимостям

$$\mathfrak{Y}_{\mathcal{I}}(\tau) = \mathfrak{Y}_{\mathcal{I}}(0) \cdot e^{-m\tau}, \quad (1)$$

$$\mathfrak{Y}(x, \tau) = A \cdot \sin\left(\frac{qx}{\delta} - \varphi\right) \cdot e^{-m\tau}, \quad (2)$$

при граничных условиях

$$\vartheta(0, \tau) = 0; \quad (3)$$

$$\vartheta(\delta, \tau) = \vartheta_{\text{я}}(\tau); \quad (4)$$

$$2\lambda S \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \Big|_{x=\delta} = -C_{\text{я}} \frac{\partial \vartheta_{\text{я}}}{\partial \tau} - K \vartheta_{\text{я}}, \quad (5)$$

где $m = -\frac{1}{\vartheta_{\text{я}}} \cdot \frac{\partial \vartheta_{\text{я}}}{\partial \tau}$; $m = aq^2 \delta^{-2}$; K - тепловая проводимость бокового зазора

между цилиндрической поверхностью ядра и корпусом бикалориметра.

После подстановки формул (2) и (3) получаем $\varphi = 0$, следовательно,

$$\vartheta(x, \tau) = A \sin(qx/\delta) \cdot e^{-m\tau}. \quad (6)$$

Из уравнений (6) и (4) получаем

$$A = \vartheta_{\text{я}}(0) / \sin q; \quad \vartheta(x, \tau) = \vartheta_{\text{я}}(\tau) \sin(qx/\delta) / \sin q. \quad (7)$$

Преобразуем формулу (5) с учётом (1)

$$2\lambda \cdot Sq \cdot \vartheta_{\text{я}} \cos(q/\delta) \cdot \sin q = (C_{\text{я}}m - K) \cdot \vartheta_{\text{я}}, \quad \text{откуда}$$

$$\frac{q}{\operatorname{tg} q} = \frac{\delta}{2\lambda S} (C_{\text{я}}m - K). \quad (8)$$

Из формулы (8)

$$\lambda = \frac{\delta}{2S} (C_{\text{я}}m - K) \frac{\operatorname{tg} q}{q}. \quad (9)$$

Определим величину $\frac{\operatorname{tg} q}{q}$.

Из формулы $m = aq^2 \delta^{-2}$ имеем $q^2 = m\delta^2 a^{-1}$. Примем $q < 0,1$, поэтому

$$\frac{\operatorname{tg} q}{q} = \frac{q + \frac{1}{3}q^3 + \dots}{q} \approx 1 + \frac{1}{3}q^2. \quad (10)$$

Из формул (9) и (10) получаем расчётную формулу:

$$\lambda = \frac{\delta}{2S}(C_{\text{Я}}m - K)\left(1 + \frac{1}{3}q^2\right). \quad (11)$$

Выполним ряд преобразований:

$$q^2 = \frac{mC_0j\delta^2}{\lambda} = \frac{mC_0j2S\delta}{C_{\text{Я}}m - K} = \frac{2C_0m}{C_{\text{Я}}m - K}. \quad (12)$$

подставим формулу (12) в (11), получаем расчетную формулу

$$\lambda = \frac{\delta}{2S}(C_{\text{Я}}m - K)\left(1 + \frac{2C_0m}{3(C_{\text{Я}}m - K)}\right) = \frac{\delta}{2S}\left[\left(C_{\text{Я}} + \frac{2}{3}C_0\right)m - K\right]. \quad (13)$$

Проводимость K может определяться в опыте с эффективным теплоизолятором, например, с воздухом, эффективный коэффициент теплопроводности которого известен, либо из двух опытов с образцами из одного материала разных толщин. Решение системы уравнений (13) в этом случае позволяет получить значения λ и K . Для данного прибора $K = 6,98 \cdot 10^{-2}$ Вт/К.

Теплоёмкость образца C_0 определяется ориентировочно по справочным данным для аналогичного материала.

Формулу (13) ещё нельзя считать окончательной, так как в ней не учитывается рассеяние теплового потока на краях образцов. Если выполняются неравенства $\delta < 0,1D_C$ и $D - D_C > 2\delta$, то поправка на рассеяние потока $\Delta\delta_P$ остаётся достаточно малой и может учитываться приближенно.

Поправка, определённая аналитически, выражается

$$\Delta\delta_P = \frac{4}{3} \cdot \frac{\delta}{D_C}. \quad (14)$$

Окончательная расчётная формула для определения коэффициента теплопроводности на бикалориметрах

$$\lambda = \frac{\delta}{2S(1 + \Delta\delta_P)}\left[\left(C_{\text{Я}} + \frac{2}{3}C_0\right)m - K\right], \quad (15)$$

здесь $C_{\text{Я}}$ - полная теплоёмкость сердечника, равная 365 Дж/К; C_0 - полная теплоёмкость одного образца, равная $C_0 = c_0j\delta S$, где S - контактная

поверхность сердечника, равная $1,13 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$. Значение λ из формулы (15) относят к температуре

$$t = t_c + 0,5\vartheta, \quad (16)$$

где t_c - температура среды (альфа блоков); ϑ - средняя температура перегрева во время опыта.

Описание экспериментальной установки

В состав экспериментальной установки входят бикалориметр, микроамперметр, и автотрансформатор.

Бикалориметр (рис.8) состоит из ядра диаметром 120 мм, толщиной 12 мм и весом 840 г, двух охлаждаемых проточной водой альфа блоков 3 диаметром 165 мм. Спаи дифференциальной медьконстантановой термопары 5 заделаны в ядро и в один из альфа - блоков. Нагреватель ядра 4 питается напряжением 50 В. (Перегрев ядра в начале опыта не должен превышать 30К).

Исследуемые образцы 1 должны иметь диаметр 150-160 мм и толщину от 5 до 20 мм. Для проведения измерений образцы помещаются между сердечником и альфа – блоками симметрично с двух сторон сердечника.

На корпусе прибора размещены два установочных кольца с винтовой нарезкой, служащих для изменения зазора между сердечником и альфа – блоками под размер исследуемых образцов. Для измерения толщины образцов на кольцах нанесена шкала делений, показывающая толщину образца в миллиметрах.

Внутри альфа - блоков 3 в свинцовой заливке помещены спиральные змеевики, по которым циркулирует охлаждающая вода. Вода может быть проточной из водопроводной сети, однако необходимо следить за стабильностью ее температуры. В случае колебания температуры воды во время проведения опыта более чем на $\pm 0,1\text{К}$ необходимо ее термостатирование.

Порядок подготовки и проведения опыта

1. Снять альфа – блоки. Прибор заполнить испытуемым материалом. При испытании твердого материала вырезать два диска диаметром 150-160 мм и толщиной от 5 до 20 мм и расположить их симметрично относительно сердечника. Плоскости образцов должны быть гладкими и ровными.

2. Установочные кольца поставить на размер 5,0 мм. Альфа – блоки опустить на образцы до соприкосновения. Толщина материала измеряется вне прибора штангенциркулем. При испытании легко сжимаемых материалов (вата, мех и т.д.) установочными кольцами предварительно

установить нужную толщину материала, уложить материал и опустить альфа – блоки до плотного касания с поверхностями колец.

3. Сыпучие материалы насыпать поочередно по обе стороны от сердечника (по одинаковой навеске); опустить альфа – блоки до полного касания с материалом и кольцо поднять до альфа – блоков.

4. По отсчетному приспособлению измерить толщину материала.

5. Закрепить альфа – блоки четырьмя подвижными винтами.

6. Пропустить воду через альфа – блоки.

7. Подключить термопару к микроамперметру.

8. На нагреватель подать напряжение 50 В. Сердечник нагреть примерно на 20-30 К выше, чем температура воды в альфа – блоках.

9. Выключить нагреватель. После того, как перегрев упадет на 15-20 К, через каждые две минуты производить запись убывающих показаний N гальванометра.

10. Всего записать 10-12 точек.

11. Построить график зависимости $\ln N = f(\tau)$, который должен иметь вид прямой линии. Рассчитать тангенс m угла наклона этой прямой, являющийся темпом охлаждения и равный

$$m = \frac{\ln N_1 - \ln N_2}{\tau_2 - \tau_1}, \quad (17)$$

где N_1 и N_2 - ординаты соответствующие моментам времени τ_1 и τ_2 .

12. Опыт повторить. Если расхождение в темпах m двух опытов менее 5%, то можно ограничиться только двумя опытами. Если расхождение более 5%, то измерения следует продолжить.

13. Снять альфа – блоки. Образцы вынуть и взвесить.

14. Произвести расчет теплопроводности исследуемого материала по формуле (15). В расчете использовать среднее из двух опытов значение темпа.

15. Рассчитать температуру отнесения по формуле (16).

ПРИМЕЧАНИЕ. При испытании твердых материалов с плотностью более 1000 кг/м^3 следует добиваться идеального теплового контакта поверхности сердечника образца и поверхности альфа – блока. Желательно поверхности смазывать маслом при условии, что материал его не впитывает. В противном случае рекомендуется проводить ряд опытов для разных толщин материалов и по полученным результатам строить график зависимости $R = f(\delta)$. Если поверхности хорошо подогнаны друг к другу, то график примет вид прямой линии. Тогда $\lambda = \delta(R_\delta + R_0)^{-1}$, где δ - некоторая абсцисса на графике; R_δ - соответствующая ордината; R_0 - отрезок ординаты, соответствующий $\delta = 0$.

Контрольные вопросы

1. Что называется регулярным режимом первого рода?
2. Где устанавливается регулярный режим в образце или в системе сердечник – образец?
3. Являются ли параметры λ , a , c , α функциями координат?
4. Как в приборе обеспечивается постоянство температуры среды?
5. Какова допустимая величина перегрева образца? Почему не меньше, не больше?
6. По какому закону изменяется температурное поле по толщине образца?
7. Какое температурное поле имеет сердечник?
8. Как изменяются температуры сердечников и образца во времени?
9. Как темп охлаждения выражается через физические характеристики тела?
10. Как определяется темп охлаждения экспериментально? Как он связан со скоростью изменения перегрева?
11. Одинаково ли значение темпа охлаждения для всех точек системы тел, находящихся в регулярном режиме?
12. В каком соотношении должны находиться теплоемкости образца и сердечника? Почему?
13. Почему на бикалориметрах нельзя испытывать образцы с малым тепловым сопротивлением?
14. Где заделаны спай дифференциальной термопары?
15. Можно ли исключить влияние одного контактного сопротивления на поверхности образца перенесением спая спая термопары в образец?
16. Нужно ли при измерении темпа охлаждения знать чувствительность термопары, измерительного прибора? Если нет, то почему?
17. Существует ли теплообмен на боковой поверхности образца? Учитывается ли он поправкой в расчетной формуле?
18. Для чего необходимо выдерживать соотношение $\lambda_{\text{я}} \gg \lambda_{\text{обр.}}$?
19. Какая площадь используется при расчете полной теплоемкости образца: $S_{\text{я}}$ или $S_{\text{обр.}}$? Почему?
20. Чем вызвано ограничение на соотношение теплоемкостей $C_{\text{я}} \gg C_{\text{обр.}}$? Какова его величина?
21. Сколько значащих цифр использовать при записи результата измерений?

Литература

1. Кондратьев Г.М. Тепловые измерения. - М.-Л.: Машгиз, 1957

Лабораторная работа № 5

Определение средней теплоемкости и энтальпии методом смещения

Цель работы – ознакомление с приемами экспериментального определения средней теплоемкости и энтальпии (теплосодержания).

Физическая сущность метода

Методы смещения были разработаны в середине XVIII века и в настоящее время являются одними из лучших и широко применяемых в лабораторной практике средств экспериментальной теплофизики. К основным достоинствам метода относятся универсальность по отношению к ассортименту исследуемых материалов, широкий диапазон рабочих температур (до 3500°C) и высокая точность измерений.

Физическая сущность метода смещения отличается простотой и состоит в следующем. Исследуемое тело (образец) массой m нагревается или охлаждается до заданной температуры t_n и затем быстро помещается внутрь калориметрического устройства, представляющего собой массивное тело (блок) с известной суммарной теплоемкостью C_k . Температура блока калориметра $t_{кн}$ перед началом опыта обычно поддерживается равной примерно 0°C, 20°C или (что реже) примерно 100°C. Попавший внутрь калориметра образец отдает свое избыточное тепло блоку, пока не сравняются их температуры.

Если принять для простоты рассуждений, что избыточное тепло образца полностью поглощается блоком (без потерь в среду), то на основании закона сохранения энергии между образцом и блоком должен выполняться следующий тепловой баланс

$$m \bar{C}(t_n, t_k)(t_n - t_k) = A(t_k - t_{кн}), \quad (1)$$

где $\bar{C}(t_n, t_k) = \frac{1}{t_n - t_k} \int_{t_k}^{t_n} C(t) dt$, $i(t_n, t_k) = \bar{C}(t_n, t_k)(t_n - t_k)$ – средняя теплоемкость и

энтальпия образца в диапазоне температур $(t_k - t_n)$; t_n – начальная температура образца; $t_{кн}$ и t_k – начальная и конечная температуры блока калориметра.

Соотношение между массами образца и блока выбирают таким, чтобы прирост температуры блока в опытах $(t_k - t_{кн})$ составлял не более 10 К. Это удобно по двум причинам: с одной стороны, не приходится учитывать температурную зависимость теплоемкости C_k блока, а с другой - несколько снижаются тепловые потери в окружающую среду.

Из уравнения (1) видно, что для определения средней теплоемкости $\bar{C}(t_n, t_k)$ и энтальпии $i(t_n, t_k)$ образца достаточно знать его массу m , постоянную калориметра $A=C_k$ (постоянную A часто называют тепловым значением или тепловым эквивалентом калориметра) и значения температур t_n , t_{kn} и t_k . Помимо этого должна быть уверенность, что в конце опыта будет удовлетворительное совпадение температур t_k образца и блока.

Однако соотношение (1), как уже отмечалось, справедливо только в том случае, когда между блоком калориметра и средой отсутствует тепловая связь. К сожалению, обеспечение такого условия требует значительных усилий и его выполнение не всегда оправдано. В связи с этим находят применение калориметры разных типов.

Метод смещения допускает применение нескольких вариантов калориметров: переменной температуры с адиабатической оболочкой, переменной температуры с изотермической оболочкой, плавления (ледяные калориметры), калориметры кипения и, наконец, калориметров испарения [1,2,3]. В калориметрах переменной температуры в качестве термометрического вещества для блока используют бурно перемешиваемую жидкость (чаще всего дистиллированную воду) или металл (медь, алюминий, латунь).

В лабораторной работе использован калориметр переменной температуры с металлическим блоком и изотермической оболочкой, поэтому все последующие рассуждения и конкретное математическое обоснование метода измерений будут относиться только к таким калориметрам.

Описание установки

Установка (рис.10) состоит из печи I, калориметра II, нескольких вспомогательных узлов и электроизмерительной аппаратуры.

Печь служит для предварительного подогрева образца 1 и собрана из металлического ядра 2 с электрическим нагревателем (нихромовая спираль) 3, водоохлаждающего кожуха 4 и легковесной теплоизоляции (кварцевое волокно) 5. Через ядро и корпус печи проходит вертикальное отверстие для транспортировки образца. Для снижения потерь и конвекции отверстие сверху закрыто крышкой 6. Подставкой для образца в печи служит металлическая игла 7.

Калориметр II состоит из массивного медного блока 8, окруженного массивной металлической оболочкой 9. В блоке и оболочке, как и в печи, находится вертикальное сквозное отверстие для транспортировки образца. Сверху отверстие блока закрыто плотно прилегающей к нему медной задвижкой 10. Снизу в блок на время опыта ввинчивается медная пробка 11. Пробка имеет хороший контакт с блоком и служит в качестве подставки для охлаждаемого образца 1. Между блоком и оболочкой замкнутая воздушная прослойка 12. Блок крепится к оболочке шестью металлическими иглами 13. Снаружи оболочка калориметра закрыта декоративным кожухом 14.

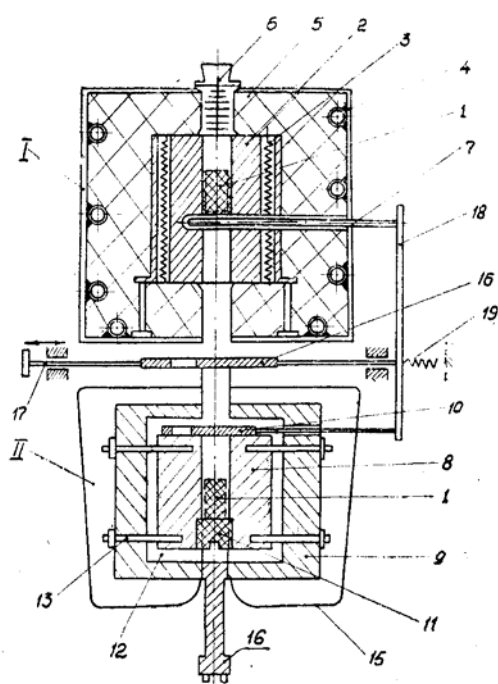


Рис.10. Конструкция
калориметрического
устройства прибора

Деталь 15 вспомогательная: во время опыта используется как заглушка нижнего отверстия в оболочке калориметра, а после опыта служит ключом для вывинчивания пробки 11, удаления образца 1 из блока и обратно ввинчивания пробки в блок.

Другими вспомогательными деталями установки являются задвижка печи 16, рукоятка 17 и рычаг 18 с пружиной 19. Рычаг осуществляет механическую связь подставки образца 7 и задвижек 10, 16, благодаря чему для свободного сброса образца 1 из печи в блок калориметра достаточно нажать рукоятку 17 и затее отпустить. Печь и калориметр укреплены на общем кронштейне и в совокупности образуют компактную вертикальную конструкцию настольного типа.

Образец закладывается в печь сверху и после опыта извлекается через нижнее резьбовое отверстие калориметра. При многократном повторении опытов блок калориметра требует периодического принудительного охлаждения. Для этого в установке предусмотрен специальный стержень, через который пропускается проточная вода. После удаления образца из блока стержень на некоторое время помещают в блок вместо пробки. Когда температура блока снизится до заданного уровня, стержень вынимают и готовят установку к очередному опыту. В частности, в блок ввинчивается пробка (об этой операции нельзя забывать, так как иначе раскаленный образец может выпасть из печи прямо на лабораторный стол и явиться причиной случайного случая).

Питание нагревателя печи производится через регулятор напряжения (автотрансформатор) типа ЛАТР-1. Температура рабочего пространства печи задается путем подачи на нагреватель определенного напряжения U . Напряжение может отсчитываться непосредственно по шкале ЛАТРа. Между ориентировочными значениями температуры t_n печи и напряжением U существует определенная зависимость (табл. 1.)

Таблица 1

Напряжение на нагревателе U , В	Температура печи t_n , К
30	220
35	320
40	410
45	500

Температура печи t_n измеряется хромель-алюмелевой термопарой, температура калориметра t_k – четырехспайным термостолбиком из меди и константана. Дифференциальная медь - константановая термопара измеряет перепад температуры $\Delta t_{k-0}(\vartheta_k)$ между калориметром и оболочкой. Весь термопарный монтаж в калориметре осуществляется внутри крепежных игл 13, в качестве которых использованы медицинские инъекционные иглы. Непосредственные измерения температуры образца ни в печи, ни в блоке калориметра не проводятся.

Установка позволяет проводить исследования с твердыми образцами в диапазоне температур от 20 до 1000°C.

Расчетные формулы

При реализации метода смещения на данной установке образец, нагретый в печи (в течение примерно 10 мин), быстро падает в калориметр. Поскольку время падения образца мало, то потерями тепла образца можно пренебречь и считать, что температура образца в момент падения у калориметр равна температуре t_n печи.

Внутри калориметра образец интенсивно охлаждается, отдавая тепло блоку через воздушную прослойку и через контакт с пробкой. Блок калориметра поглощает избыточное тепло образца и повышает свою температуру $t_k(\tau)$, перегреваясь относительно изотермической оболочки. Возникновение перепада $\vartheta_k(\tau) = t_k(\tau) - t_{об}$ приводит к тому, что часть тепла из блока теряется через воздушную прослойку между блоком и оболочкой и поглощается непосредственно оболочкой.

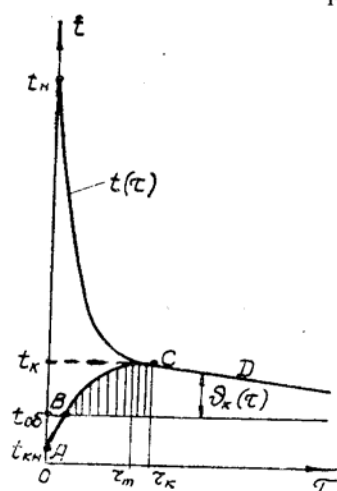


Рис. 11.
Температурный режим
прибора.

Типичный график изменения температуры $t(\tau)$ в системе «образец-блок-оболочка» показан на рис.11 для общего случая, когда в начальный момент попадания образца в калориметр блок калориметра оказывается несколько переохлажденным относительно оболочки: в точке А $\vartheta_{кн} = t_{кн} - t_{об} < 0$. Точка В кривой $t_k(\tau)$ соответствует моменту $\vartheta_k = 0$. В точке С температуры образца $t(\tau)$ и блока $t_k(\tau)$ сравнялись. Участок CD соответствует совместному охлаждению блока и образца. Конец рабочей части опыта соответствует точке С и моменту τ_k . При наличии теплообмена между блоком и оболочкой тепловой баланс внутри системы «образец-блок-оболочка» в произвольный момент времени τ на рабочем участке АС

подчиняется уравнению

$$mC(t)\left(\frac{dt}{d\tau}\right) = A\left(\frac{dt_{\kappa}}{d\tau}\right) + \alpha F_{\kappa} \cdot \vartheta_{\kappa}(\tau). \quad (2)$$

Интегрирование уравнения (2) на участке 0 - τ_{κ} дает нам общий тепловой баланс для системы

$$\int_0^{\tau_{\kappa}} mC(t)\left(\frac{dt}{d\tau}\right)d\tau = \int_0^{\tau_{\kappa}} A\left(\frac{dt_{\kappa}}{d\tau}\right)d\tau + \alpha F_{\kappa} \int_0^{\tau_{\kappa}} \vartheta_{\kappa} d\tau$$

или $m\bar{C}(t_{\text{н}}, t_{\kappa})(t_{\text{н}} - t_{\kappa}) = A(t_{\text{н}} - t_{\kappa}) + \alpha F_{\kappa} \int_0^{\tau_{\kappa}} \vartheta_{\kappa} d\tau. \quad (3)$

Согласно (3) расчетные формулы для энтальпии $i(t_{\text{н}}, t_{\kappa})$ и средней теплоемкости $\bar{C}(t_{\text{н}}, t_{\kappa})$ образца приобретают вид

$$i(t_{\text{н}}, t_{\kappa}) = \frac{1}{m} \left[A(t_{\kappa} - t_{\text{кн}}) + \alpha F_{\kappa} \int_0^{\tau_{\kappa}} \vartheta_{\kappa} d\tau \right], \quad (4)$$

$$\bar{C}(t_{\text{н}}, t_{\kappa}) = \frac{i(t_{\text{н}}, t_{\kappa})}{t_{\text{н}} - t_{\kappa}} = \frac{1}{m(t_{\text{н}} - t_{\kappa})} \left[A(t_{\kappa} - t_{\text{кн}}) + \alpha F_{\kappa} \int_0^{\tau_{\kappa}} \vartheta_{\kappa} d\tau \right]. \quad (5)$$

В формулы помимо массы образца m и температуры $t_{\text{н}}, t_{\text{кн}}, t_{\kappa}$ вошла поправка на теплообмен блока калориметра с оболочкой

$$\Delta Q_{\alpha} = \alpha F_{\kappa} \int_0^{\tau_{\kappa}} \vartheta_{\kappa} d\tau. \quad (6)$$

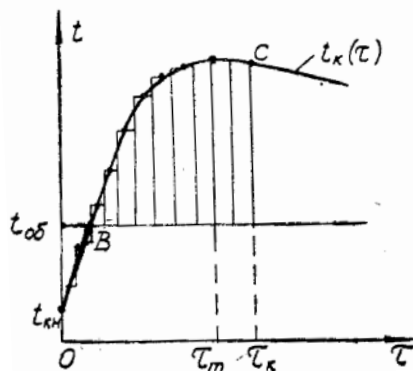


Рис.12. Расчет поправки ΔQ_{α}

Для отыскания ее необходимо знать эффективную проводимость (αF_{κ}) между блоком и оболочкой и хотя бы примерный вид экспериментальной кривой $\vartheta_{\kappa}(\tau)$ роста перегрева блока относительно оболочки. Проводимость (αF_{κ}), как и тепловое значение A , отыскивается в каждом калориметре экспериментальным путем, с помощью специальных градуировочных опытов и является «постоянной прибора».

Поправка ΔQ_α рассчитывается в каждом опыте приближенно графическим интегрированием кривой $\vartheta(\tau)$ на участке $(0-\tau_k)$. При интегрировании обязательно учитывать знак $\vartheta_k(\tau)$. Пример графического

интегрирования показан на рис.12. Интеграл $I = \int_0^{\tau_k} \vartheta_k(\tau) d\tau$ физически означает площадь заштрихованной области на графике, причем участок площади, лежащей над кривой $t_{об}$, является положительным, а под кривой – отрицательным. Для графического интегрирования отрезок $(0-\tau_k)$ делится на n равных по величине отрезков, на каждом отрезке кривая $\vartheta_k(\tau)$ заменяется средним значением (точки на графике) и вся площадь под кривой заменяется прямоугольниками. Площадь их вычисляется и алгебраически суммируется:

$$\Delta Q_\alpha = \alpha \cdot F_k \int_0^{\tau_k} \vartheta_k d\tau = \alpha \cdot F_k \cdot \sum_{j=1}^n \overline{\vartheta_{kj}} \cdot \Delta\tau. \quad (7)$$

Окончательные расчетные формулы целесообразно представить в виде, более удобном для практических расчетов, а именно:

$$i(t_k, t_n) = \frac{1}{m} [A(E_k - E_{кн}) + \Delta Q_\alpha] \quad (8)$$

$$\overline{C}(t_n, t_k) = \frac{1}{m(t_n - t_k)} [A(E_k - E_{кн}) + \Delta Q_\alpha], \quad (9)$$

$$\text{где } \Delta Q_\alpha = k \sum_{j=1}^n \overline{e_{Kj}} \cdot \Delta\tau. \quad (10)$$

Здесь m – масса образца, кг; A – тепловое значение калориметра, Дж/мВ; k – коэффициент, Вт/мВ; сигналы E_k , $E_{кн}$ в мВ; сигнал $\overline{e_{Kj}}$, мВ; $\Delta\tau$ – время, с. Сигнал $\overline{e_K}(\tau)$ соответствует показаниям термопары $\vartheta_k(\tau)$.

Отметим, что установка имеет ряд эксплуатационных особенностей:

1) исследования температурного поля печи показали, что между температурой рабочего пространства печи t_n и показаниями термопары $t_{нп}$ существует систематическая погрешность. С учетом ее для перехода от $t_{нп}$ к t_n следует использовать соотношение

$$t_n = 0,984 t_{нп}; \quad (11)$$

2) температура блока калориметра $t_k = f(E_{k/4} + E_{xc})$ определяется по градуировочной таблице меди и константана.

При градуировке были получены следующие параметры установки:

$$A = 556 \pm 6 \text{ Дж/мВ}; \quad k = 27,7 \text{ Вт/мВ}.$$

Порядок подготовки и проведения опыта

После ознакомления с принципом действия установки необходимо получить у преподавателя исследуемый образец и конкретное техническое задание.

Для проведения опыта необходимо:

1. Установить на ЛАТРе напряжение, соответствующее заданному в техзадании уровню температуры печи (см. таблицу 1). Включить систему водяного охлаждения установки и подключить ЛАТР через стабилизатор к сети.
2. Взвесить образец.
3. Опустить образец в отверстие печи.
4. Подготовить калориметр к опыту. При этом проверить наличие пробки 11 (см. рис. 11) в блоке.
5. Проверить исправность электрических цепей термопар. Включить гальванометр М195/1 и милливольтметр ВК2-20.
6. Подготовить таблицу для записи опыта по предлагаемой форме (табл.2)

Таблица 2

№ опыта	m , кг	$E_{нп}$, мВ	$t_{нп}$, °С	$E_{кн}$, мВ	$t_{кн}$, °С	E_k , мВ	t_k , °С	τ_k , с
	τ , с							
	e_k , дел							

7. Начать контроль за наступлением стационарного режима в печи. Для этого установить переключатель пульта в положение t_n и контролировать через каждые 2-5 мин. сигнал $E_{нп}$. Стационарный режим можно считать наступившим, если за пять минут сигнал $E_{нп}$ изменит свое значение не более, чем на 0,5%.

8. При установлении стационарного режима измерить $E_{нп}$, $E_{кн}$, E_k и занести их значения в табл.2. При регистрации $E_{кн}$ переключатель на пульте поставить в положение t_k

9. Довести до упора рукоятку заслонок. При этом должен слышаться характерный звук упавшего образца. Сразу же включить секундомер.

10. Снять с помощью секундомера кривую показаний $\Delta t_{k-0} = e_k(\tau)$ и занести показания e_{kj} в соответствующие столбцы табл. 2. Показания снимать через

каждые 15 с. Опыт обычно продолжается около 5 мин. Отсчет показаний $e_k(\tau)$ можно заканчивать, когда сигнал e_{kj} перестанет расти и появится тенденция к его снижению. После этого, не останавливая секундомера, следует быстро снять отсчет E_k , остановить секундомер и зафиксировать его показание, соответствующее концу рабочей части опыта. Показания E_k (в мВ) и τ_k (в с) занести в табл. 2.

11. Вынуть образец из калориметра и поместить снова в печь. Подготовить калориметр к опыту и повторить все операции опыта. Как было отмечено ранее, образец в печи должен находиться не менее 10-15 мин, иначе его температурное поле не успеет выравниваться и достичь значения t_n . Опыт повторить 3 раза.

Задание по работе

1. Ознакомиться с теорией метода.
2. Ознакомиться с описанием и конструкцией калориметра смешения.
3. Провести измерение средней теплоемкости одного образца (опыт повторить 3 раза).
4. Провести обработку результатов.
5. В отчете поместить основные расчетные формулы и пояснения к ним, таблицу опытных данных и результаты их обработки. К отчету прикладываются все первичные данные опытов и график расчетов поправки ΔQ_α .
6. Сопоставить результаты измерений с литературными данными [3].

Контрольные вопросы

1. Как определить среднюю теплоемкость C и энтальпию i ?
2. Какие существуют типы калориметров смешения?
3. Какими способами устраняется или учитывается теплообмен калориметра со средой в разных типах калориметров?
4. Какие термометрические вещества используются в калориметрах с переменной температурой?
5. Из какого материала изготовлен блок калориметра в лабораторной установке?
6. Как удалить образец из калориметра?
7. Как измеряется начальная температура образца?
8. Для чего проводится измерение перепада температуры?
9. Назначение пассивного термостата в приборе. Как влияет на результат измерения C изменение температуры холодных концов в термостате?
10. Какими методами и приборами измеряются t_{np} , t_k , t_{kn} , ϑ_k ?
11. Чем определяется значительное время выдержки образца в печи? Как величина C изменится при недостаточной выдержке?

12. Как влияют на результат измерения $\bar{C}$ потери тепла при падении образца?

13. Чем определяются время проведения калориметрического опыта? Каковы экспериментальные признаки его окончания? Как изменится измеренное значение $\bar{C}$, если время меньше рекомендуемого?

14. Как определяются потери тепла от калориметра в данном приборе?

15. Сколько спаев в термобатареи для измерения $t_{\text{кн}}$ и $t_{\text{к}}$?

16. Какие из величин $t_{\text{к}}$, $t_{\text{кн}}$, $\vartheta_{\text{к}}$ необходимо измерять наиболее точно?

17. Какова относительная величина потока рассеивания в данном приборе?

18. Каков порядок величин $\bar{C}$ для сталей, полимеров, окислов, неметаллических жидкостей, тяжелых металлов?

Литература

1. Конспект лекций по курсу «Теплофизические свойства веществ».
2. Кондратьев Г.М. Металлический шаровой блок-калориметр смещения свободно-охлаждаемый. Сб. трудов ЛИТМО, вып. 21, Изд. ЛИТМО, 1957.
3. Варгафтик Н.Б. Теплофизические свойства веществ. М.-Л., 1956.

Лабораторная работа № 6

Исследование истинной теплоемкости материалов

Цель работы – ознакомление с теоретическими методами расчета истинной теплоемкости C твердых одноатомных тел и экспериментальным методом определения истинной теплоемкости материалов в режиме монотонного нагрева.

На приборе «динамический s -калориметр» проводится измерение истинной теплоемкости данного образца (с объемной) теплоемкостью $C_p \geq 1 \cdot 10^6$ Дж/м³·К) в диапазоне температур от -150 до 400°С.

Задание к работе

1. Ознакомиться с теоретическим методом определения теплоемкости твердых тел при различных температурах $C(t)$ [1,2].
2. Провести расчеты теплоемкости твердых веществ (по указанию преподавателя) по формулам Эйнштейна и Дебая в диапазоне температур $0 \leq T/T_d \leq 10$.
3. Ознакомиться с методикой и прибором для определения коэффициента теплоемкости.
4. Получить образцы для измерения теплоемкости.
5. Провести измерения теплоемкости $C(t)$ образцов.
6. Сопоставить расчетные и экспериментальные значения теплоемкости исследуемого материала; дать анализ расхождения между ними.
7. В отчете изложить метод расчета теплоемкости твердых одноатомных тел по формулам Эйнштейна и Дебая; поместить графики расчетных значений $C_p = f(t)$, принципиальную схему s -калориметра и таблицу опытных данных с расчетами; представить результаты сопоставления расчета и измерения.

Описание прибора

Измеритель теплоемкости ИТ–С–400 предназначен для исследования температурной зависимости удельной теплоемкости твердых тел, сыпучих, волокнистых материалов, жидкостей, и рассчитан на проведение массовых теплофизических исследований в лабораторных и заводских условиях.

В основу работы измерителя положен сравнительный метод динамического s -калориметра с тепломером и адиабатической оболочкой.

Тепловая схема метода показана на рис.13. Образец испытуемый 1 размещается внутри металлической ампулы 2 и монотонно разогревается вместе с ней за счет непрерывно поступающего к ампуле через тепломер 3 теплового потока. Открытые участки поверхности ампулы отделены от среды

адиабатической оболочкой 4. Тепловой поток Q_T , проходящий через среднее сечение тепломера, идет на разогрев образца и ампулы и определяется

$$Q_T = Q_0 + Q_a, \quad (1)$$

где Q_0 - тепловой поток, идущий на разогрев образца испытуемого, Вт; Q_a - тепловой поток идущий на разогрев ампулы, Вт.

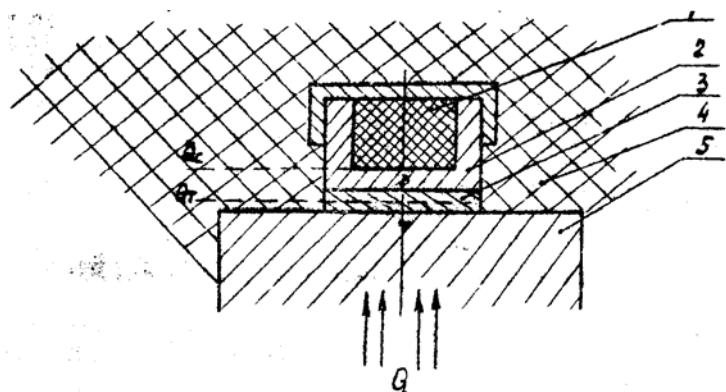


Рис.13.Тепловая схема

Тепловой поток, идущий на разогрев образца испытуемого, определяется по формуле:

$$Q_0 = c \cdot m_0 \cdot b, \quad (2)$$

$$Q_a = C_a \cdot b, \quad (3)$$

где C_a — полная теплоемкость ампулы, Дж/К.

О величине теплового потока, проходящего через тепломер Q_T , удастся судить по величине перепада температуры на тепломере ϑ_T и тепловой проводимости тепломера K_T , определенный из независимых градуировочных экспериментов:

$$Q_T = \vartheta_T \cdot K_T. \quad (4)$$

Параметр $K_T = K_T(t)$ является постоянной прибора и зависит только от температурного уровня. Расчетная формула теплоемкости имеет вид:

$$c = \frac{1}{m_0} \cdot \left(\frac{K_T \cdot \vartheta_T}{b} - C_a \right), \quad (5)$$

где c — удельная теплоемкость образца, Дж/(кг·К).

При малых перепадах температуры на тепломере можно перейти к измерению времени запаздывания температуры на тепломере, учитывая, что

$$\tau_T = \vartheta_T / b, \quad (6)$$

где τ_T — время запаздывания температуры на тепломере, сек.

Тогда рабочая расчетная формула примет вид:

$$C = \frac{K_T}{m_0} (\tau_T - \tau_T^0), \quad (7)$$

где τ_T^0 — время запаздывания температуры на тепломере в экспериментах с пустой ампулой, сек, (τ_T^0 является постоянной измерителя).

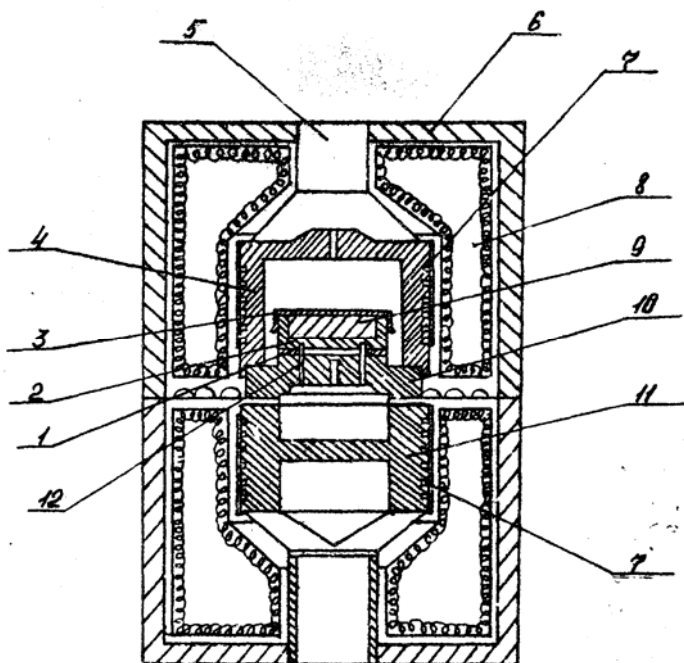


Рис.14.Конструкция с – калориметра

На рис.14 представлена конструкция с-калориметра: 1-тепломер; 2-ампула; 3-крышка; 4-колпак охранный (адиабатическая оболочка); 5-патрубок; 6-корпус; 7-спираль нагревателей; 8-оболочка теплоизоляционная; 9-образец испытуемый; 10-основание; 11-блок нагревательный; 12-термопары.

Подготовка к работе

1. Проведите электрическую стыковку блоков и прибора Ф136 кабелями, входящими в комплект прибора в соответствии с ПУ 2.899.022.Э4.
2. Переведите переключатель «СЕТЬ», «НАГРЕВ» в положение «ВЫКЛ»
3. Подключите блок питания и регулирования и прибор Ф136 к сети 220 В, 50 Гц.
4. Установите:
 - переключатель «ИЗМЕРЕНИЕ» в положение «УСТ.0»
 - переключатель «ТЕМПЕРАТУРА» в положение 25°C.
5. Замкните входные штекеры прибора Ф136 и произведите коррекцию нуля.
6. Взвесьте образец с точностью $\pm 0,001$ г.
7. Занесите полученное значение в табл.1.
8. Поднимите верхнюю часть ячейки измерительной.
9. Протрите бензином и нанесите тонкий слой смазки ПФМС-4 на контактные поверхности образца, ампулы и крышки.
10. В ампулу установите испытуемый образец и закройте ампулу крышкой.
11. Опустите верхнюю часть ячейки измерительной.
12. Включите блок питания и регулирования, нажав кнопку «СЕТЬ».
13. Выведите по вольтметру блока питания и регулирования напряжение до нуля.

Порядок проведения эксперимента

1. Установите переключатель «ИЗМЕРЕНИЕ» в положение t_1 .
2. Проведите охлаждение ячейки измерительной (при работе от минус 100°C), для чего:
 - налейте в бачок для охлаждения жидкий азот из транспортировочного сосуда Дьюара (тип АСД-16 ГОСТ 16024-79).
 - установите бачок на верхний колпак блока измерительного.
 - следите по прибору Ф136 в процессе охлаждения за температурой ячейки измерительной, последовательно (от плюс 25 до минус 125°C) проводя переключения рукояткой «ТЕМПЕРАТУРА».
 - снимите бачок с колпака блока измерительного после достижения температуры в измерительной ячейке, близкой к температуре испарения азота, о чем свидетельствует равенство термо-ЭДС термопар № 1,2.
3. Включите кнопкой «НАГРЕВ» основной нагреватель и установите по вольтметру блока питания и регулирования начальное напряжение 20 ± 2 В при работе от минус 100°C.
4. ПРИМЕЧАНИЕ: при проведении экспериментов от 20°C начальное напряжение устанавливается 40 ± 2 В.

5. Включите секундомер при достижении температуры минус 100°C (при прохождении светового указателя прибора Ф136 через нуль шкалы) и переведите переключатель «ИЗМЕРЕНИЕ» в положение t_2 . Выключите секундомер при прохождении светового указателя через нуль шкалы.

6. Запишите показания секундомера в графу « τ_T » табл. 1.

7. Повторите измерения τ_T при всех значениях температур, указанных в табл.1.

8. Выключите нагреватель при достижении желаемого уровня температуры или предельной температуры разогрева образца.

9. Зааретируйте прибор Ф136.

10. Установите переключатель «ИЗМЕРЕНИЕ» в положение УСТ.0.

11. Выключите блок питания и регулирования.

12. Поднимите верхнюю часть корпуса ячейки измерительной.

13. Охладите ячейку измерительную до комнатной температуры (может использоваться вентилятор).

14. Проведите расчет удельной теплоемкости по формуле 7.

Таблица 1

Дата				Опыт № ИТ-с-400	
Испытуемый образец Смазка				m=	(кг)
$t_c, ^\circ\text{C}$	$\tau_T, ^\circ\text{C}$	$\bar{\tau}_T, ^\circ\text{C}$	$K_T, \text{Вт/К}$	$C, \text{Дж/кг}\cdot\text{К}$	
25					
50					
75					
100					
125					
150					
175					
200					
225					
250					
275					
300					
325					
350					
375					
400					

Градуировка измерителя

Градуировка заключается в экспериментальном определении тепловой проводимости тепломера K_T . Для этого проводятся эксперименты с медным образцом и с пустой ампулой.

Тепловая проводимость тепломера определяется по следующей формуле:

$$K_T = \frac{C_{обр.М}}{\bar{\tau}_{TM} - \bar{\tau}_T^0}, \quad (8)$$

где $C_{обр.М}$ - полная теплоемкость медного образца, Дж/К; $\bar{\tau}_{TM}$ - среднее значение времени запаздывания на тепломере в экспериментах с медным образцом, сек.; $\bar{\tau}_T^0$ - среднее значение времени запаздывания на тепломере с пустой ампулой, сек.

Среднее значение времени запаздывания на тепломере определяется как среднее арифметическое из пяти экспериментов, проведенных в соответствии с разделом «Порядок проведения эксперимента». Среднее значение запаздывания на тепломере в экспериментах с медным образцом определяется по формуле:

$$\bar{\tau}_{tm} = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_{tim}}{n} \quad (9)$$

где τ_{tim} - измеренное время запаздывания на тепломере в эксперименте с медным образцом в сек; n - число измерений ($n=5$).

Аналогичным образом определяется среднее значение времени запаздывания на тепломере в экспериментах с пустой ампулой по следующей формуле:

$$\bar{\tau}_m^0 = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_{mi}^0}{n}, \quad (10)$$

где τ_{mi}^0 - измеренное время запаздывания на тепломере в эксперименте с пустой ампулой в сек.

Полная теплоемкость медного образца вычисляется по формуле:

$$C_{обр. М} = C_M \cdot m_{обр}, \quad (11)$$

где C_M -табличное значение удельной теплоемкости меди, Дж/(кг · К); $m_{обр}$ - масса медного образца, кг.

Вычисленные значения K_T , τ_m^{-0} заносятся в таблицу и используют при эксплуатации измерителя.

При градуировке приборов ИТ-с-400 на Актюбинском заводе «Эталон» применяется смазка ПФМС-4 и опыты проводятся во всем температурном диапазоне. В случае изменения смазки или начала температурного диапазона, необходима новая градуировка с измененными условиями.

Контрольные вопросы

1. Основные допущения и ограничения в теории монотонного нагрева.
2. Чем отличается теория монотонного нагрева от теории регулярного режима II рода?
3. Основные допущения, сделанные при выводе расчетной формулы (7).
4. Получите расчетные формулы для определения постоянных калориметра.
5. На основании какого допущения среднеобъемная температура заменяется среднеповерхностной?
6. Как изменится расчетная формула (7), если не будут выполняться допущения?
7. Можно ли исследовать материал с $C_p < 1 \cdot 10^6$ Дж/м³·К? Почему?
8. Для чего полируются поверхности шахты и стаканчика?
9. К чему приведет изменение степени черноты поверхности стаканчика?
10. Что произойдет с показаниями прибора, если в рабочий слой тепломера попадет грязь? Вода?
11. Для чего жестко фиксируется стаканчик в шахте?
12. Для чего смазывают капсулу?
13. Можно ли исследовать материалы с большим ТКЛР (если можно, то на каких образцах)?
14. К чему приведет увеличение воздушного зазора в тепломере?

Литература

1. Таблица физических величин. Справочник под ред. И.К. Киокина. М., Атомиздат, 1976.
2. Платунов Е.С. Теплофизические измерения в монотонном режиме. «Энергия», 1973.
3. Прибор для комплексных теплофизических измерений (ДК-асл-400). Изв. Вузов СССР – «Приборостроение», 1972, т. 14, № 1, с. 130. Авторы: Е.С.Платунов, В.В.Курепин, И.Ф.Шубин, Ю.В.Алешкевич.

Лабораторная работа № 7

Измерение температурных коэффициентов линейного расширения материалов

Цель работы – ознакомление с аппаратурой и техникой измерения температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) твердых материалов.

Физическая сущность метода

Тепловым расширением называют такое явление, при котором изменяются размеры и формы тела в результате изменения его температуры при постоянном давлении [1,2]. Это явление характеризуется термическим коэффициентом линейного расширения α , который представляет собой относительное изменение размеров тела при изменении его температуры на 1К.

Для инженерных расчетов применяются как истинные, так и средние значения ТКЛР. В частности, для расчета напряжений, возникающих в деталях (оптических линзах, зеркалах, активных телах лазеров и др.), необходимо использовать истинные ТКЛР, а для расчета изменения размеров тела вследствие теплового расширения удобно пользоваться их средним значением.

Средние ТКЛР $\bar{\alpha}$ обычно в справочниках даются в температурном интервале 0 - $t^{\circ}\text{C}$ или 20 - $t^{\circ}\text{C}$. Соотношения между изменением размера тела и температурными коэффициентами линейного расширения следующие

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{l_n} \cdot \frac{l_t - l_n}{t - t_n}, \text{ K}^{-1} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{1}{l_t} \cdot \frac{dl}{dt}, \text{ K}^{-1} \quad (2)$$

где l_t и l_n – линейный размер тела при температурах t и 20°C (или 0°C) соответственно; (l_t, l_n) – удлинение тела при подъеме температуры от t_n до t .

По простым соотношениям с достаточной для практики точностью можно определить средние ТКЛР по известным истинным значениям и истинные α - по известным средним значениям:

$$\bar{\alpha}(t_1, t_2) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \alpha(t) dt}{t_2 - t_1}, \quad (3)$$

$$\alpha(t) = \frac{\bar{\alpha}_2 t_2' - \bar{\alpha}_1 t_1'}{t_2' - t_1'}, \quad (4)$$

где $\alpha(t)$ – зависимость истинного ТКЛР от температуры в интервале t_2-t_1 ; $\bar{\alpha}_2$ и $\bar{\alpha}_1$ средние ТКЛР в температурных интервалах t_2-t_1 и t_1-t_1' соответственно; $t_1=0,5(t_2+t_1')$; $t_2'+t_1'$ – небольшой (не более 50K) интервал температур, в котором закон расширения материалов можно считать линейным.

Объемное расширение тел по аналогии с линейным будет характеризоваться средним температурным коэффициентом объемного расширения $\bar{\beta}$ и истинным температурным коэффициентом объемного расширения β , которые можно определить из выражений:

$$\bar{\beta} = \frac{1}{v_n} \cdot \frac{v_t - v_n}{t - t_n}, \text{ K}^{-1} \quad (5)$$

$$\beta = \frac{1}{v_t} \cdot \frac{dv}{dt}, \text{ K}^{-1} \quad (6)$$

Длину тела можно измерить значительно точнее, чем его объем. Поэтому принято измерять изменение линейных размеров твердого тела, вызванного изменением его температуры, а затем, в случае необходимости, расчетным путем определять объемное расширение.

В изотропных материалах достаточно точно выполняется соотношение между соответствующими значениями коэффициентов $\beta=3\alpha$.

Наименьшим ТКЛР обладают твердые окислы (стекла, керамика) $\bar{\alpha} = (3 \div 8) \cdot 10^{-6}, \text{ K}^{-1}$.

Несколько большие значения характерны для металлов и сплавов $\bar{\alpha} = (10 \div 90) \cdot 10^{-6}, \text{ K}^{-1}$ Для армированных пластмасс $\bar{\alpha} = (0,3 \div 1,0) \cdot 10^{-4}, \text{ K}^{-1}$ а для аморфных полимеров $\bar{\alpha} = (0,3 \div 2,0) \cdot 10^{-4}, \text{ K}^{-1}$.

Определение ТКЛР материалов сводится к измерению длины испытуемого материала и его температуры. Приборы, применяемые для этой цели, носят название дилатометров.

В лабораторной работе при исследовании ТКЛР материалов в интервале температур от -150°C до 400°C используется механический сравнительный dilatометр.

Описание установки

Принципиальная схема dilatометра показана на рис.15. Образец 1 помещен в удерживающее устройство, состоящее из трубки 2 и толкателя 3. Удерживающее устройство с образцом помещается в печь 4 с нагревателем 5.

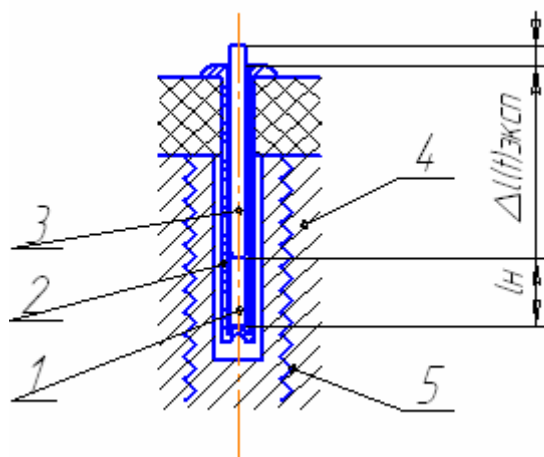


Рис.15. Принципиальная схема измерительной ячейки dilatометра

На конце трубки и толкателя (находящихся, как правило, в холодной зоне при комнатной температуре) размещается устройство для измерения удлинения образца. Измерительное устройство воспринимает разность перемещений $\Delta l(t)$ трубки 2 и суммы перемещений образца 1 и толкателя 3. Введение аналитической поправки на удлинение удерживающей системы затруднительно, так как температурное поле системы по высоте и по радиусу сугубо неравномерное (исключая зону размещения образца), а ТКЛР звеньев передающей системы известны недостаточно точно.

Для уменьшения величины поправки трубу и толкатель выполняют из материалов с минимальным ТКЛР, например, из плавленого кварца ($\bar{\alpha} = 0,4 \cdot 10^{-6}, \text{K}^{-1}$). Эту поправку на изменение длины удерживающей системы проще получить экспериментально из опыта на образце с известным ТКЛР, например, на плавленом кварце. Искомая поправка рассчитывается по формуле:

$$\Delta l_0(t) = \Delta_{\text{экс}}(t) - \Delta l_{\text{обр}}(t), \quad (7)$$

где $\Delta l_{\text{обр}}(t) = \bar{\alpha}_{\text{обр}} \cdot l_n \cdot (t - t_n)$, $\bar{\alpha}_{\text{обр}}$ - средний ТКЛР для плавленого кварца; l_n, t_n - начальная длина и температура образца.

Точность dilatометра во многом определяется стабильностью поправки $\Delta l_0(t)$ при эксплуатации прибора. Соответственно при расчете ТКЛР в формулы вместо величины $\Delta l(t)$ следует подставлять разность экспериментально найденного удлинения $\Delta l_{\text{экс}}(t)$ и поправки $\Delta l_0(t)$, т.е. $\Delta l_{\text{экс}}(t) - \Delta l_0(t)$. Температура образца измеряется обычно термопарой,

расположенной в образце либо вблизи него. Начальная длина образца измеряется при $t_H=20^\circ\text{C}$.

Схема дилатометра показана на рис.16. Он состоит из основания 15, устройства 8, удерживающего образец 10, и узла измерения перемещений 12, 13, 14, а печь – из металлического ядра 1, водоохлаждаемого кожуха 2 и теплоизоляции 3. Для лучшего выравнивания температуры внутри печи ядро изготовлено из меди. На наружной поверхности ядра в пазах расположен нихромовый нагреватель 4. Внутри ядра имеются каналы 5 для охлаждения водой или жидким азотом, который подается по трубке 6 из сосуда Дьюара. Ядро крепится к основанию на двух трубках 6 и металлической стойке 7. В осевое отверстие ядра вставляется удерживающее устройство дилатометра с образцом. Оно состоит из кварцевой трубки 8 и кварцевого толкателя 9.

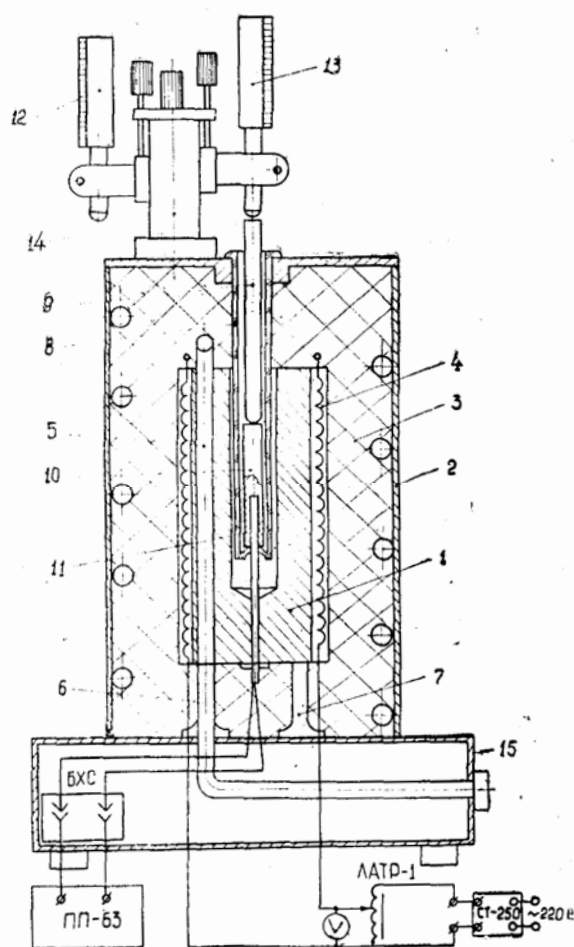


Рис.16. Схема дилатометра

Образец 10 размещается внутри трубки 8 и надет на термопару, армированную металлической иглой 11. Термопара подключается к блоку холодных спаев, расположенному в основании прибора, сигнал ее измеряется потенциометром ПП-63.

Узел измерения перемещений состоит из поворотной колонки 14 и двух индикаторов 12 и 13 с ценой деления 0,01 мм (общий ход 10 мм) и 0,002 мм (общий ход 1 мм). Выбор того или иного индикатора определяется величиной ТКЛР материала. Для измерения ТКЛР окислов и металлов рекомендуется использовать индикатор с ценой деления 0,002 мм, а для полимеров с ценой деления 0,01 мм.

Нагреватель питается переменным напряжением от автотрансформатора ЛАТР-1 через стабилизатор СТ-250.

Измерения ТКЛР проводятся в динамическом режиме при разогреве со скоростью $\approx 0,1$ К/с. Рекомендуемые значения напряжения питания приведены в таблице 1.

Таблица 1

Рабочий диапазон, °С	Напряжение питания, В
0 – 150	80
150 – 300	90
300 – 400	100

На точность измерения ТКЛР оказывают влияние механические (неустойчивое положение образца в процессе эксперимента, наличие трения в системе крепления деталей, передающих удлинение образца измерительному прибору, чувствительность прибора к вибрациям) и тепловые факторы (наличие градиентов температур по высоте образца и прилегающих к образцу деталей). Погрешности, обусловленные этими факторами, кроме погрешности из-за неустойчивости положения образца, являются систематическими.

Их влияние учитывается поправкой $\Delta l_0(t)$. Как показывают исследования дилатометра, неучтенная часть поправка $\Delta l_0(t)$ достигает величины 0,005 мм. Из инструментальных погрешностей наиболее значительный вклад вносит погрешность измерения удлинения $\delta(\Delta l)$. Относительная погрешность измерения ТКЛР на данном дилатометре не превышает 0,5% при доверительной вероятности $P=0,95$.

Методика проведения опыта

Измерение ТКЛР материалов проводятся на образцах в виде цилиндра диаметром 5 мм, высотой 60 мм, с отверстием вдоль оси под термопару. В кварцевую трубку закладывается исследуемый образец с толкателем. Трубка через отверстие в крышке прибора устанавливается в нагревательный блок. Положение индикатора фиксируется относительно толкателя. Индикатор выставляется на нуль с помощью винтов для вертикального перемещения. На нагреватель подается напряжение в соответствии с данными таблицы 1. Затем через каждые 0,5 мВ по индикатору снимается величина текущего удлинения. Данные заносятся в таблицу 2.

Порядок подготовки и проведения опыта

ВНИМАНИЕ: позиции 1–3 выполняются только в присутствии преподавателя!

1. Включить водяное охлаждение!
2. Заложить образец в кварцевую трубку!
3. Подвести индикатор и установить на нуль!
4. На потенциометре последовательно установить э.д.с., указанные в таблице 2.

5. Установить напряжение на ЛАТРе по табл. 1.
6. При достижении уровня температуры, указанного в табл. 2, снять значение удлинения и занести в эту же таблицу.
7. При достижении заданного уровня температуры снять напряжение с ЛАТРа, выключить потенциометр ПП-63 (конечный уровень температуры задается преподавателем).

Таблица 2

ΔE , мВ	t , °C	Δl , мм	Δl_0 , мм	$\Delta l - \Delta l_0$, мм	$\bar{\alpha}$, K ⁻¹	α , K ⁻¹	$\delta = \frac{\bar{\alpha} - \alpha_m}{\alpha_m}$, %
Для напряжения 80 В							
0,5	33		0				
1,0	47		-0,0004				
1,5	60		-0,0005				
2,0	72		-0,0006				
2,5	85		-0,0007				
3,0	97		-0,0009				
3,5	108		-0,0010				
4,0	121		0,0006				
4,5	132		0,0009				
5,0	143		0,0012				
Для напряжения 90 В							
5,5	155		0,0024				
6,0	165		0,0031				
6,5	175		0,0034				
7,0	185		0,0038				
7,5	196		0,0039				
8,0	206		0,0044				
8,5	216		0,0045				
9,0	226		0,0046				
9,5	236		0,0048				
10,0	246		0,0050				
10,5	255		0,0052				
11,0	264		0,0055				
11,5	273		0,0059				
12,0	283		0,0065				
12,5	292		0,0069				
13,0	301		0,0075				

Задание по работе

1. Ознакомиться с методом измерения и конструкции лабораторного dilatометра.
2. Провести измерение $\bar{\alpha}(t)$ одного образца в широком диапазоне температур по указанию преподавателя.
3. Построить график зависимости $\Delta l - \Delta l_0 = f(t)$, провести сглаживающую кривую и рассчитать $\bar{\alpha}$ и $\alpha(t)$, как показано на рис.17 для температур $t=50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400^\circ\text{C}$.
4. Рассчитать относительную погрешность $\delta(\bar{\alpha})$ для двух температур по указанию преподавателя.
5. В отчете поместить принципиальную схему dilatометра, таблицу данных с расчетами, графики $\bar{\alpha}(t)$ и $\alpha(t)$.

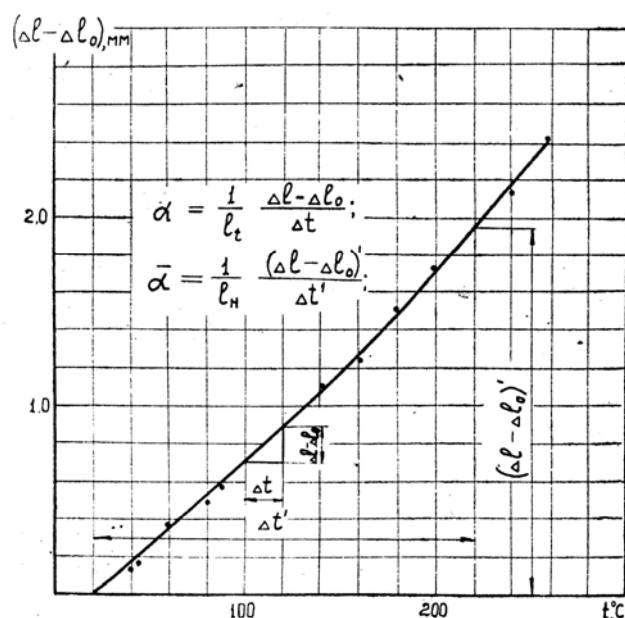


Рис.17. Обработка эксперимента

Контрольные вопросы

1. Дать определение истинного и среднего ТКЛР.
2. В каких технических расчетах применяют $\alpha(t)$ и $\bar{\alpha}(t)$?
3. Какая связь между $\alpha(t)$ и $\bar{\alpha}(t)$?
4. Дать определение истинного и среднего температурного коэффициента объемного расширения.
5. Какая связь между $\bar{\beta}(t)$ и $\beta(t)$?
6. Какая связь между $\alpha(t)$ и $\beta(t)$ для изотропных материалов?

7. Какие порядки имеют величины $\alpha(t)$ и $\bar{\alpha}(t)$ для основных групп материалов?
8. Какая существует классификация дилатометров по методам измерений?
9. Каково влияние на результат измерения температурного расширения трубки, толкателя, стоек блока, кожуха и поворотной колонки дилатометра?
10. Как определяют поправку $\Delta l_0(t)$?
11. Какие возникают трудности в расчетном определении поправки $\Delta l_0(t)$?
12. На каком образце проводится градуировка прибора?

Литература

1. Конспект лекций по курсу «Теплофизические свойства веществ».
2. Аматуни А.Н. Методы и приборы для определения температурных коэффициентов линейного расширения материалов. Изд. стандартов, 1972.



История кафедры компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга

Начало теплофизической научной школы в университете было положено организацией в 1938 году кафедры приборов теплосилового контроля, заведующим которой стал профессор, доктор технических наук Г.М.Кондратьев (1887-1958). В 1954 году вышла в свет его монография «Регулярный тепловой режим». Изложенные в ней идеи впоследствии были успешно применены в различных областях, например, при создании нового типа приборов для исследования теплофизических свойств веществ и параметров теплообмена. В начале 50-х годов началась разработка методов теплового расчета радиоэлектронных устройств, а в дальнейшем и других приборов – оптических, оптико-электронных, гироскопических. Серия этих работ была выполнена под руководством Заслуженного деятеля науки и техники РФ, профессора, доктора технических наук Дульнева Г.Н., возглавлявшего кафедру с 1958 года по 1995 год. В результате был создан новый математический аппарат анализа теплового режима сложных технических систем и приборов, разработаны методы проектирования приборов с заданным тепловым режимом. Комплекс этих работ признается и в нашей стране, и за рубежом как новое научное направление в теплофизике. Кафедра приборов теплосилового контроля за свою многолетнюю историю не раз изменяла свое название. Так, с 1947 года она именовалась кафедрой тепловых и контрольно-измерительных приборов, с 1965 года – кафедрой теплофизики, с 1991 года – кафедрой компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга. Однако основным направлением ее научной и педагогической деятельности оставалось применение учения о теплообмене в физике и приборостроении. С 1995 года заведующим кафедрой является профессор, доктор технических наук А.В.Шарков.

Многолетняя деятельность кафедры привела к созданию научной и педагогической школы теплофизиков-приборостроителей, из которой вышли доктора наук А.Н.Гордов, А.И.Лазарев, Г.Н.Дульнев, Б.Н.Олейник, Е.С.Платунов, Н.А.Ярышев, В.Н.Васильев, Ю.П.Заричняк, А.В.Шарков и другие ученые-теплофизики.

Сотрудники кафедры принимали участие в разработке нового поколения вычислительных машин, исследовании термооптических явлений в космических комплексах, в реализации международных программ космических исследований. Так, предложенные на кафедре методы были

использованы при проектировании телевизионных камер космических аппаратов в проекте «ВЕГА», при создании лазерного устройства в проекте «ФОБОС». Возможности разработанных на кафедре методов математического моделирования тепловых процессов в сложных системах и технике теплофизического эксперимента были продемонстрированы при анализе процессов теплообмена в организме человека; при создании электрогенераторов, работа которых использует явления сверхпроводимости; при создании оригинальных образцов оборонной, медицинской и измерительной техники.

В рамках традиционных направлений развиваются работы по созданию методов и приборов для измерения температуры, тепловых потоков, теплофизических свойств веществ, исследования коэффициентов переноса в неоднородных средах, а также работы по созданию принципиально новых композиционных материалов – особо прочных, термостойких, теплоизоляционных и т.д.

В последние годы наряду с традиционными научными направлениями появился ряд новых направлений, связанных с экологическим мониторингом, энергосберегающими технологиями, биологией и медицинским теплофизическим приборостроением. На базе ведущихся на кафедре научных исследований осуществляется обучение молодых специалистов, первый выпуск которых по специальности «Теплофизика» состоялся в 1969 году. В 1998 году кафедра получила также право обучения по новому для нашего университета направлению – «Техническая физика». В июне 1998 года состоялся первый выпуск бакалавров, а в 2000 году – магистров.

На кафедре ведется подготовка научных кадров высшей квалификации в аспирантуре и докторантуре по специальностям 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника» и 05.11.01 «Приборы и методы измерения тепловых величин». Сейчас коллектив кафедры продолжает развитие как ставших уже традиционными научных направлений и направлений подготовки специалистов, так и ведет поиск в новых областях науки и техники.