

Министерство высшего и среднего специального  
образования Р С Ф С Р

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени  
авиационный институт имени академика С.П.Королева

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Утверждено редакционно-издатель-  
ским  
советом института  
в качестве методических указаний  
к лабораторным работам  
по курсу "Теплопередача"

Куйбышев 1983

Практикум содержит подробное описание цикла из трех лабораторных работ, выполненных по курсу "Теплопередача", для студентов дневного и вечернего отделений всех факультетов КуАИ.

Описаны конструкции лабораторных установок, изложены методики проведения экспериментов и обработки их результатов по темам: "Теплопроводность металлов и сыпучих материалов", "Термическое сопротивление металлических стыков".

Практикум может быть полезен сотрудникам отраслевых научно-исследовательских лабораторий.

Составители: Н.Н.О г о р д н и к о в (2),  
Н.Д.К о л ы ш е в (1,3)

Рецензенты: д.т.н., проф. А.В.Т е м н и к о в,  
д.т.н., проф. А.А.Ж и р н о в

# Лабораторная работа № I

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛА

**Ц е л ь р а б о т ы :** изучение методики исследования; приобретение навыков экспериментального исследования частных задач теплопроводности; углубление знаний по вопросам теплопроводности.

### З а д а н и е

1. Провести эксперимент и определить значение коэффициента теплопроводности исследуемого металлического образца.
2. Составить отчет о выполненной работе.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Теплопроводность представляет собой молекулярный перенос тепла в телах, обусловленный разностью температур в рассматриваемом пространстве.

Теплопроводность безоговорочно имеет место лишь в твердых телах. В основу аналитической теории теплопроводности положен феноменологический метод: теория теплопроводности игнорирует молекулярное строение вещества и рассматривает его как сплошную среду.

Необходимым условием образования теплового потока является неравномерность распределения температуры в рассматриваемой среде. Для передачи тепла теплопроводностью необходимо неравенство нуля температурного градиента в различных точках тела.

Согласно гипотезе Фурье количество тепла  $dQ$ , проходящее через элемент изотермической поверхности  $dF$  за промежуток времени  $d\tau$ , пропорционально температурному градиенту  $\partial t / \partial n$ :

$$dQ = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} dF \cdot d\tau, \quad (1)$$

где  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности.

Если количество переданного тепла отнести к единице площади изотермической поверхности в единицу времени, то зависимость (1) можно представить в виде

$$\bar{q} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} = -\lambda \cdot \text{grad} t, \quad (2)$$

где  $\bar{q}$  - плотность теплового потока,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ .

Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  при этом определяется из соотношения:

$$\lambda = \frac{|\bar{q}|}{|\text{grad} t|}, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}, \quad (3)$$

из которого следует, что коэффициент теплопроводности численно равен количеству тепла, проходящего в единицу времени через единицу площади изотермической поверхности при значении градиента температуры на ней, равного единице.

Коэффициент теплопроводности - физическая характеристика вещества, определяющая его способность проводить тепло. Для различных веществ при прочих равных условиях количество проходящего тепла определяется только величиной  $\lambda$ .

Теплопроводность металлов в основном осуществляется за счет диффузии свободных электронов. Для большинства чистых металлов с повышением температуры коэффициент теплопроводности убывает. Наличие разного рода примесей снижает  $\lambda$ . Для чистой меди  $\lambda = 396$ , для меди со следами мышьяка  $\lambda = 142 \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$ . Для железа с 0,1% углерода  $\lambda = 52$ , с 1% углерода  $\lambda = 40$ . Для закаленной углеродистой стали  $\lambda$  на 10...25% ниже, чем для мягкой. Установить какую-либо общую закономерность влияния примесей на величину  $\lambda$  пока невозможно. Поэтому для металлов и их сплавов только опыт является надежным способом определения коэффициента теплопроводности.

В лабораторной установке используются образцы из бронзы и латуни. Зависимость их теплопроводности от температуры [1] приведена в таблице, из которой видно, что при почти одинаковых исходных компонентах сплавов  $\lambda$  колеблется в широких пределах.

## Коэффициент теплопроводности сплавов

Сплав	Состав, %	$t, ^\circ\text{C}$			
		0	100	200	300
Бронза	85 Cu; 6 Sn; 6 Zn; 3 Pb	62	69	75	81
Латунь	96 Cu; 4 Zn	244	245	246	249
- " -	68 Cu; 32 Zn	105	108	110	113
- " -	62 Cu; 38 Zn	102	116	132	148
- " -	59 Cu; 36 Zn; 3 Al; 2 Ni	81	93	106	119
- " -	58 Cu; 40 Zn; 2 Mn	67	78	88	97
- " -	58 Cu; 40,7 Ni; 1,3 Pb	122	122	123	124

## ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Существуют два основных метода экспериментального определения коэффициента теплопроводности:

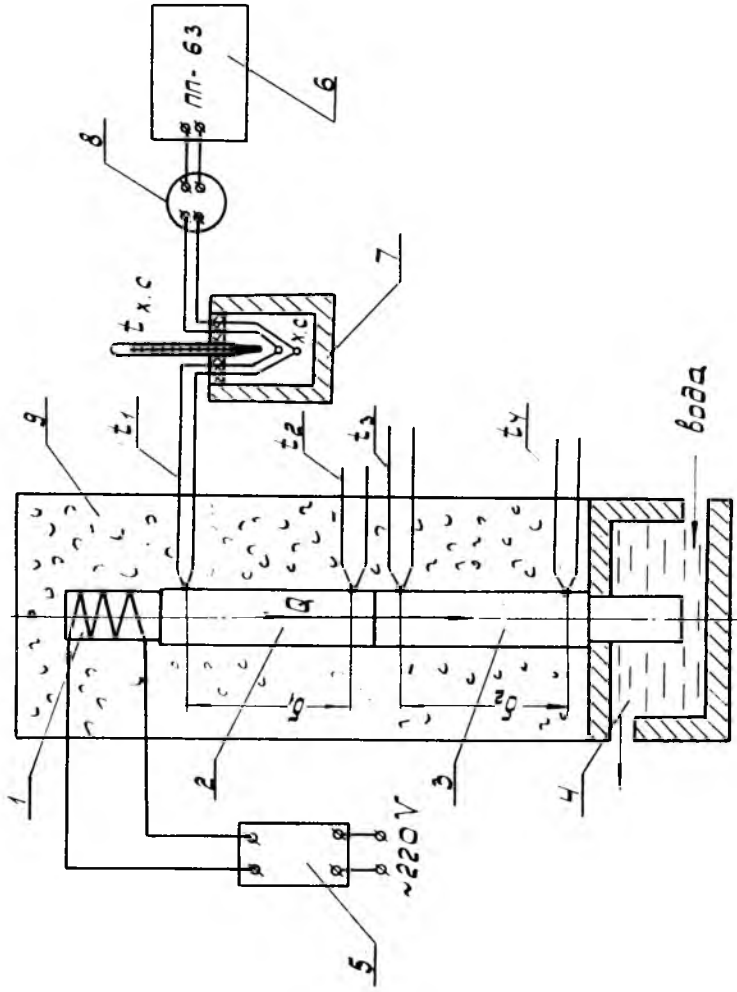
абсолютный, основанный на измерении величин  $q, \text{gradt}$  и вычислении  $\lambda$  по формуле (3);

относительный, при котором тепловой поток не измеряется, а коэффициент теплопроводности вычисляется по измеренным температурным градиентам в исследуемом материале и в образце.

Общий вид экспериментальной установки для определения коэффициента теплопроводности металла представлен на рис. Установка состоит из цилиндрического бронзового стержня 2 диаметром 30 мм, верхний конец которого снабжен электронагревателем 1. Нижний торец бронзового стержня спаян (для лучшего термического контакта) с верхним торцом испытуемого (латунного) стержня 3, диаметр которого также равен 30 мм. Свободный конец испытуемого стержня охлаждается проточной водой, протекающей через холодильник 4.

Электронагреватель 1 питается через автотрансформатор 5 стабилизированным напряжением.

Температура в концевых сечениях стержней измеряется с помощью хромель-копелевых (ХК) термопар ( $t_1, \dots, t_4$ ) и потенциометра 6. Каждая термопара вставлена в сверление перпендикулярно оси образца на глубину 15 мм. Холодные спаи термопар собраны в термостатическую коробку 7, ее температура регистрируется ртутным термометром. Измерение ЭДС производится с помощью потенциометра 6 (ПД-63), связанно-



Р и с. Экспериментальная установка для определения коэффициента теплопроводности металла

го с термомпарами через переключатель 8. Точность измерения температуры образцов составляет  $2...3^{\circ}\text{C}$ .

Расстояние между термомпарами в каждом образце одинаково – 35 мм. Нагреватель и образцы окружены кожухом с тепловой изоляцией 9, что позволяет создать одномерный стационарный тепловой поток вдоль стержневой системы. Таким образом, поле температур в системе одномерно, а изотермические поверхности имеют форму поперечного сечения стержня и расположены параллельно его основанию; распределение температуры по длине стержня имеет линейный характер. Температурный режим установки стабилизируется примерно через 30 мин. после ее включения. При этом с достаточной точностью можно считать, что через оба стержня проходит одинаковый тепловой поток.

#### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Включить подачу воды в холодильник 4, на нагреватель подать мощность ( $\sim 200$  Вт) с помощью автотрансформатора 5. После достижения стационарного распределения температуры в стержнях произвести измерение ЭДС термомпар.

Обработка результатов опыта ведется в следующем порядке:

1. Расшифровываются показания термомпар (по градуировочным таблицам ХК термомпар с учетом температуры холодных спаев).

2. Определяется коэффициент теплопроводности бронзы ( $\bar{\lambda}_{\text{бр}}$ ) при средней температуре верхнего стержня:

$$\bar{t}_{\text{бр}} = \frac{t_1 + t_2}{2}, ^{\circ}\text{C}.$$

Определение  $\bar{\lambda}_{\text{бр}}$  производится графическим интерполированием данных из табл.

3. Коэффициент теплопроводности латунного (исследуемого) стержня рассчитывается следующим образом.

Если пренебречь потерями тепла в окружающую среду через тепловую изоляцию, то можно принять:

$$q_{\text{бр}} = q_{\text{лат}},$$

что на основании формулы (2) выражается следующим образом:

$$\bar{\lambda}_{\text{сп}} \cdot g \text{grad} t_{\text{сп}} = \bar{\lambda}_{\text{лат}} \cdot g \text{grad} t_{\text{лат}}, \quad (4)$$

где

$$g \text{grad} t_{\text{сп}} = \frac{t_2 - t_1}{\delta_1}, \quad \frac{^\circ\text{C}}{\text{м}}; \quad (5)$$

$$g \text{grad} t_{\text{лат}} = \frac{t_4 - t_3}{\delta_2}, \quad \frac{^\circ\text{C}}{\text{м}}; \quad (6)$$

$\delta_1 = \delta_2 = 0,035 \text{ м}$  - расстояние между терпарами соответственно  $t_1$  и  $t_2$ ,  $t_3$  и  $t_4$ .

Из формул (4), (5), (6) следует:

$$\bar{\lambda}_{\text{лат}} = \lambda_{\text{сп}} \frac{\delta_2}{\delta_1} \cdot \frac{t_1 - t_2}{t_3 - t_4}, \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}. \quad (7)$$

По формуле (7) рассчитывается  $\bar{\lambda}_{\text{лат}}$  - коэффициент теплопроводности латунного (исследуемого) стержня при его средней температуре

$$\bar{t}_{\text{лат}} = \frac{t_3 + t_4}{2}, \quad ^\circ\text{C}.$$

4. По определенной величине  $\bar{\lambda}_{\text{лат}}$  можно ориентировочно оценить химический состав исследуемого латунного стержня, пользуясь данными табл.

#### СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Принципиальная схема установки.
2. Протокол записи измерений.
3. Обработанные результаты опыта.



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЗАЧЕТУ

1. Каково математическое выражение гипотезы Фурье?
2. Что выражает величина коэффициента теплопроводности?
3. Какова размерность коэффициента теплопроводности?
4. Как влияют примеси на коэффициент теплопроводности металлов?
5. Объясните порядок выполнения работы.
6. Объясните порядок определения температуры по величине измеренной ЭДС с помощью градуировочной таблицы термопары ХК.
7. Объясните формулы, используемые для обработки результатов эксперимента.

## ПРОТОКОЛ ОПЫТА

Номер термопары	Е изм мВ	Е х.с мВ	Е табл. мВ	$t_{х.с}$ °С	$t_{стерж.}$ °С	$\lambda$ лат Вт/м·К
1						
2						
3						
4						

Студент \_\_\_\_\_

Преподаватель \_\_\_\_\_

## Л и т е р а т у р а

Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент.  
Справочник. М., Энергоиздат, 1982. 122с.

## Лабораторная работа № 2

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Ц е л ь р а б о т ы : ознакомление с экспериментальными методами определения теплофизических характеристик материалов.

#### З а д а н и е

Определить на экспериментальной установке коэффициент теплопроводности зерненого шамота.

#### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Накопление сведений о теплофизических характеристиках различных материалов является важной задачей, потому что на этой основе производится проектирование многочисленных промышленных объектов.

Лабораторные методы определения коэффициента теплопроводности многочисленны. Конструктивное разнообразие установок зависит от характера материала и уровня температур, в пределах которых проводится исследование. Все известные методы принципиально делятся на два вида: стационарные и нестационарные.

В данной работе используется метод стационарного теплового потока. Все методы стационарного потока опираются на известные решения задач о тепловом потоке через плоскую, цилиндрическую или сферическую стенку.

В свою очередь методы делятся на абсолютные и относительные. В абсолютных методах на испытательной установке через испытуемый материал проходит весь тепловой поток. Тепло вводится с помощью электрических нагревателей и учитываются по электрическим приборам.

В относительных методах (главным образом, методы плоского слоя) теплопроводность испытуемого материала определяется на основе законности температурного поля, создаваемого в двухслойной стенке,

где одна стенка - исследуемый материал, а другая стенка выполнена из эталонного материала с известной теплопроводностью.

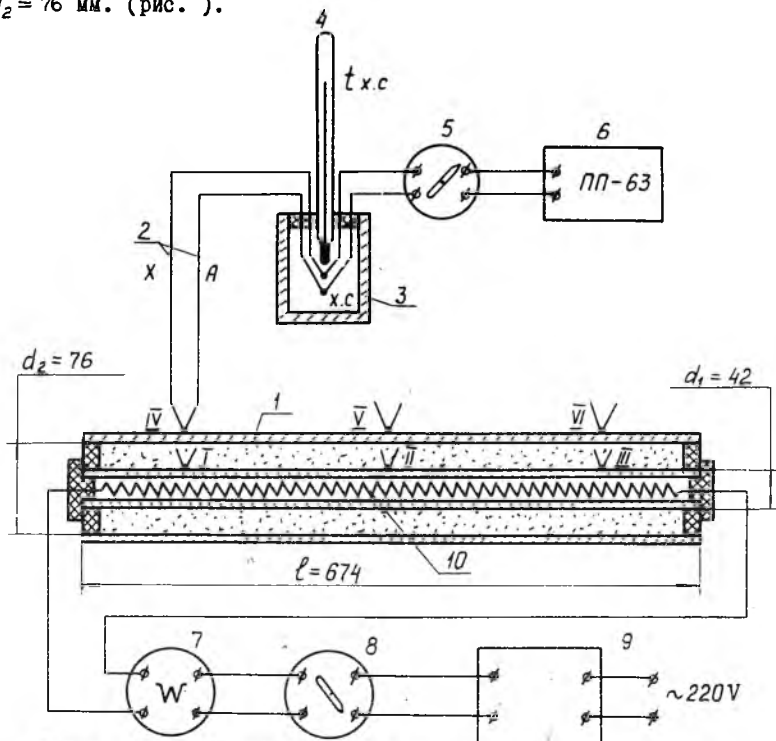
Абсолютные методы считаются более точными.

### ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Установка предназначена для определения теплопроводности сыпучих материалов с размерами зерна не более двух миллиметров.

Метод абсолютный. Центральная часть установки

$\lambda$  - калориметр I - выполнена по схеме цилиндрического слоя. Калориметр собран из двух концентрически расположенных труб  $d_1 = 42$  мм и  $d_2 = 76$  мм. (рис. ).



Р и с . Схема установки для определения коэффициента теплопроводности сыпучих материалов методом труб

Кольцевой зазор (17 мм) между трубами заполняется с торца испытуемым материалом. Торцевые крышки и проставки для уменьшения концевых тепловых потерь выполнены из термостойкого пластика.

В центре внутренней трубы расположен электронагреватель 10, мощностью 200 Вт.

На поверхности каждой трубы размещены по три термопары (ХА)2 (IУ,У,УI - внешняя труба; I,П,Ш - внутренняя труба).

Холодные спаи всех термопар собраны в термостатическую коробку 3. Их температура регистрируется ртутным термометром 4. Потенциальные выводы присоединены к переключателю 5, который соединен с потенциометром 6. Электрическое питание нагревателя осуществляется стабилизированным напряжением от сети переменного тока 220 В.

Для регулирования мощности в цепь включен лабораторный автотрансформатор 8. Мощность  $W$  регистрируется точным ваттметром 7.

#### ПРОВЕДЕНИЕ ОПЫТА

Установка подключается к электросети при "0" положении рукоятки трансформатора.

Затем изменением напряжения мощность нагревателя поднимается до 200 Вт, происходит разогрев калориметра. В этом режиме калориметр выдерживается, пока температура на поверхности внутренней трубы не достигнет 200-220°C, (регистрируется по одной из термопар I-Ш. Показание потенциометра  $\sim 7,5 \dots 8,0 \text{ mV}$ ).

Затем мощность несколько снижается таким образом, чтобы температура сохранялась приблизительно постоянной. В дальнейшем периодически производится измерение температуры внешней поверхности, чтобы добиться стационарного теплового потока.

Признаком стационарности является постоянство температур обеих поверхностей, которая проверяется по неизменности показаний потенциометра, производимое несколько раз с интервалами в 5-10 мин. По достижении стационарности регистрируются:

1. Показания потенциометра по шести термопарам,  $mV$ .
2. Показания ваттметра, Вт.

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТА

1. Расшифровываются значения температур по таблицам ХА термомпар.

2. Определяются средние температуры поверхностей:

а) внутренняя  $t_{1cp} = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{3}$ , °C;

б) внешняя  $t_{2cp} = \frac{t_4 + t_5 + t_6}{3}$ , °C.

3. Рассчитывается значение коэффициента теплопроводности  $\lambda$ .

В основу расчета принимается формула теплового потока для участка цилиндрической стенки

$$Q = 2\pi \ell \lambda \frac{t_{1cp} - t_{2cp}}{\ln \frac{d_2}{d_1}}, \text{ Вт}, \quad (I)$$

где  $Q = W$  - количество тепла, проходящего через слой испытуемого материала, Вт;

$\ell = 0,674$  - длина трубы, м;

$t_{1cp}$  и  $t_{2cp}$  - средние температуры внутренней и внешней поверхности;

$d_1$  и  $d_2$  - диаметры цилиндрического слоя испытуемого материала (42 и 76 мм, см. рис. );

$\lambda$  - коэффициент теплопроводности испытуемого материала, Вт/м °C.

Решая уравнение (I) относительно  $\lambda$ , получаем:

$$\lambda = \frac{\ln \frac{d_2}{d_1}}{2\pi \ell} \cdot \frac{W}{t_{1cp} - t_{2cp}}. \quad (2)$$

Первая дробь содержит постоянные величины и является константой установки, которую обозначим С:

$$C = \frac{\ln \frac{d_2}{d_1}}{2\pi \ell} = 0,14, \text{ 1/м}. \quad (3)$$

С учетом сокращения (3), расчетная формула для определения  $\lambda$  приобретает вид:

$$\lambda = 0,14 \frac{W}{t_{1cp} - t_{2cp}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°C}}. \quad (4)$$

Отчет о выполненной работе должен содержать принципиальную схему установки, протокол наблюдений и расчет всех параметров.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЗАЧЕТУ

1. Каков физический смысл коэффициента теплопроводности?
2. Каков закон распределения температуры по толщине испытуемого материала?
3. Что такое градиент температуры и какова его размерность?
4. На каком диаметре в установке больше градиент температуры в слое?
5. Каким образом передается тепло через прослойку сыпучего материала?
6. В чем условность коэффициента теплопроводности для сыпучих материалов?
7. Можно ли назначить в установке толщину испытуемого слоя, соизмеримой с размерами нескольких зерен материала (3-5 шт.)?
8. Как будет изменяться величина  $\lambda$  с возрастанием средней температуры слоя?

ПРОТОКОЛ ОПЫТА

Дата испытания \_\_\_\_\_

Измеряемые параметры						Вычисляемые величины									
ЭДС термопар			W			Температуры поверхностей °C									
$E_1$	$E_2$	$E_3$	$E_4$	$E_5$	$E_6$	$Вт$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_6$	$t_{1,ср}$	$t_{2,ср}$	$\lambda$
$мВ$	$мВ$	$мВ$	$мВ$	$мВ$	$мВ$										$\frac{Вт}{м^2 \cdot C}$

$t_{х.с} =$  \_\_\_\_\_ температура холодного спая

Студент \_\_\_\_\_

$E_{х.с}$  \_\_\_\_\_ поправка на температуру холодного спая

Преподаватель \_\_\_\_\_

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТЫКОВ

Ц е л ь р а б о т ы : углубление знаний по вопросам контактно-го теплообмена, ознакомление с методикой исследования и приобретение навыков проведения эксперимента (в результате работы должно быть усвоено понятие о термическом сопротивлении и физической природе этого явления).

### З а д а н и е

1. Провести эксперимент и определить величину термического сопротивления стыка двух металлических образцов.
2. Составить отчет о выполненной работе.

### ТВОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Происхождение термина *т е р м и ч е с к о е с о п р о т и в - л е н и е* связано со структурой формулы для определения теплового потока в процессах стационарной теплопроводности:

$$q = \frac{t_1 - t_2}{R} . \quad (I)$$

Выражение (I) является универсальной формой определения величины стационарного теплового потока, проходящего через единицу изотермической поверхности в единицу времени. Из данной формулы следует, что величина теплового потока  $q$  всегда пропорциональна разности температур и обратно пропорциональна фактору  $R$ , которому присвоен термин *т е р м и ч е с к о е (тепловое) с о п р о т и в л е н и е*. Этот термин наиболее употребителен при рассмотрении одномерных задач



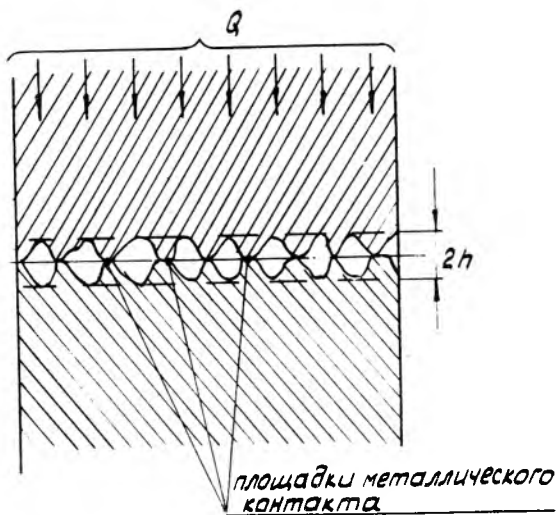
стационарной теплопроводности. Структура величины  $R$  индивидуальна для каждого типа задач.

До недавнего времени в инженерной практике существовало мнение о том, что в стыке двух металлических деталей не может возникать какого-либо заметного сопротивления переходу тепла из одной детали в другую. В расчетах тепловых сопротивлений пакетов стыкованных деталей сопротивление самих стыков (фланцевые соединения по плоскости, соединения цилиндров на прессовой посадке и др.) не учитывалось. При создании устройств с большой тепловой напряженностью (ГТД, ЖРД и др.) пришлось обратить серьезное внимание на роль стыков в общем тепловом сопротивлении.

Подробные экспериментальные исследования в этом плане были проведены Украинской Академией Наук. Как показали результаты, металлические стыки даже при наличии высокой чистоты сопрягаемых поверхностей (высота неровностей от 2 до 20 мкм) и при значительных удельных давлениях (до 12 МПа) обладают заметным тепловым сопротивлением. Действие стыка в указанном смысле как бы эквивалентно дополнительному утолщению основной стенки. Абсолютная величина эквивалентного утолщения  $\delta_s$  зависит от класса чистоты сопрягаемых поверхностей, удельного давления и теплопроводности металла. Она может изменяться от долей миллиметров до нескольких десятков миллиметров.

В теплонапряженных конструкциях через их стенки могут проходить очень большие тепловые потоки (до  $2 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$ ). Температуры сред, контактирующих со стенкой, могут достигать 2300–3300<sup>0</sup>С, (например, в камере сгорания ЖРД). Чтобы поддерживать температуру стенки на допустимом уровне, ее внешнюю поверхность охлаждают, при этом тепловое сопротивление ее должно быть минимальным. С целью соблюдения этого условия назначается минимально допустимая толщина стенки и подбирается материал, обладающий максимальной теплопроводностью. Толстая стенка в подобных условиях начала бы разрушаться из-за перегрева с горячей стороны. Во многих случаях абсолютная толщина стенок составляет 1–5 мм. Поэтому всякого рода причины, вызывающие хотя бы местные увеличения тепловых сопротивлений, недопустимы, так как они могут стать потенциальным источником аварийности.

Физическая природа теплового сопротивления стыка связана с явлением микрошероховатости сопрягаемых поверхностей. На рис. 1 дана схема стыка двух металлических деталей при большом увеличении.



Р и с . I . Схема стыка двух металлических деталей при сильном увеличении

Действительная площадь металлического контакта в сотни и даже тысячи раз меньше площади видимого сопротивления. Сопрягаемые детали разделены громадным количеством ячеек неправильной формы, заполненных воздухом. Перенос тепла в стыке происходит посредством теплопроводности через площадки прямого металлического контакта, а также путем излучения и теплопроводности через воздушные ячейки.

Предельные размеры ячеек  $2h$  невелики – от долей микрон до десятков микрон. Однако теплопроводность воздуха в 2000–15000 раз меньше теплопроводности металлов. Лучистый перенос в окружении металлических поверхностей – процесс не интенсивный. Повышенное тепловое сопротивление объясняется наличием воздушных прослоек.

В районе стыка в пределах зоны, протяженность которой можно оценить величинами порядка  $(2-3)h$ , по обе стороны от плоскости разреза возникает весьма сложная картина распределения линий теплового тона (за пределами этой зоны тепловой поток равномерно распределен по площади поперечного сечения). Общий тепловой поток разветвляется на множество мелких потоков с различной плотностью. Наиболее концентрированные элементарные потоки направлены к площадкам непосредственного металлического контакта, образованным смятием выступов микрошероховатости.

Картина температурного поля в районе стыка также становится весьма сложной. Увеличение теплового сопротивления приводит к резкому возрастанию среднего градиента температуры по нормали к плоскости стыка и соответственно к резкому падению температуры.

Характерным свойством температурных полей является самовыравнивание. Если в однородном поле в силу каких-либо причин возникают местные неоднородности, то на некотором удалении от области возмущения поле выравнивается и снова приобретает простейшую, наиболее устойчивую форму (следствие второго начала термодинамики).

Профессор Г.Н.Дульнев на примере специального аналитического решения показал и экспериментально подтвердил, что область резких изменений температурного поля в таких случаях выражается величиной того же порядка, что и занимаемая источником возмущения. Таким образом, можно считать, что приведенная картина сложного поля тепловых потоков и соответствующая ей картина температурного поля проявятся в основном в пределах удвоенной величины микрошероховатости ( $2h$ ), т.е. реально проявляются на участке, исчисляемом десятными долями миллиметра.

Экспериментально произвести какие-либо измерения в такой области не представляется возможным. Замер распределения температуры вдоль потока на расстояниях нескольких миллиметров от стыка еще не позволяет обнаружить искажения температурного поля.

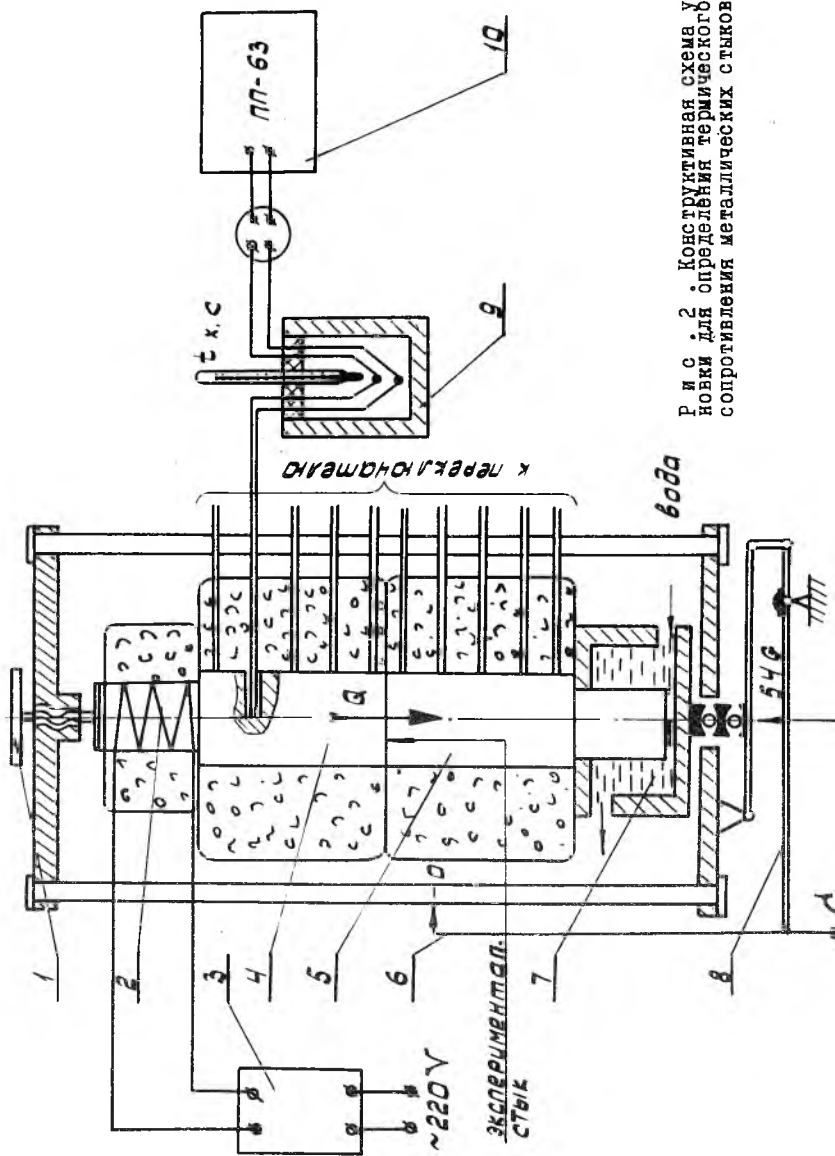
Однако если результаты таких измерений экстраполировать до плоскости стыка, то при этом всегда наблюдается резкое изменение температуры, по которому и определяется само сопротивление. Только условно можно называть это резкое изменение температуры температурным скачком.

#### ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Схема установки представлена на рис.2.

Исследуемый стык образован между двумя цилиндрическими образцами 4 и 5 ( $d = 30$  мм).

Образцы скomплектованы в комбинациях материалов, указанных в табл. Высота неровностей на торцевых поверхностях около 80 мкм.



Р и с 2. Конструктивная схема установки для определения термического сопротивления металлических стыков.

Т а б л и ц а

Номер устано-вки	Расположение стержня	Материал стержня	$\lambda$ , Вт/м.град
1	верхний	алюминиевый сплав (97% Al, 3% Mg)	167
	нижний	латунь (62% Cu, 38% Zn)	116
2	верхний	сталь 14х17Н2	23
	нижний	сталь 17х18Н9	16

П р и м е ч а н и е : значение коэффициента теплопроводности соответствуют средним температурам образцов.

Верхний образец 4 нагревается с помощью электрического нагревателя 2, питаемого через трансформатор 3 (питание осуществляется через ЛАТР-1 стабилизированным напряжением). Нижняя часть образца 5 охлаждается проточной водой, проходящей через холодильник 7. Нагреватель и образцы окружены жестяными коробками с тепловой изоляцией.

Конструкцией установки предусматривается создание стационарного одномерного потока тепла вдоль стержневой системы. Для обнаружения эффекта термического сопротивления стыка производится измерение температур по длине образцов с помощью десяти хромель-алюмелевых (ХА) термопар и потенциометра 10. Термопары (по 5 штук в каждом образце) изготовлены из проволок диаметром 0,23 мм и армированы двухканальной керамикой ( $d = 1,5$  мм). Каждая термопара вставлена в сверление перпендикулярно оси образца на глубину 15 мм, холодные спаи термопар собраны в термостатическую коробку 9. Ее температура регистрируется ртутным термометром. Измерение ЭДС производится с помощью потенциометра 10 (ПП-63), связанного с термопарами через десятичный переключатель. Точность измерения температур составляет 2-3<sup>0</sup>С.

Для создания различных удельных давлений в стыке внизу установки имеется рычажная схема 8 с плечевым отношением 1:54, которая может нагружаться гириями (от 1 до 5 штук по 2 кг). Эта система

вместе с винтом I и указателем 6 обеспечивает во время опыта постоянное давление в стыке, компенсируя тепловое расширение стержневой системы.

Конструктивная схема расположения термопар представлена на рис.3. Здесь показано распределение температур по стержням.

#### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Рычажная система 8 (см.рис. 2) освобождается от арретира и нагружается гирями. С помощью верхней рукоятки I она устанавливается в нулевое положение по указателю 6. Включается подача воды в холодильник 7. На нагреватель подается мощность в 400 Вт, которая с помощью ЛАТР-I в течение опыта поддерживается постоянной.

По достижении стационарного распределения температур (60-80 мин) в стержневой системе производится замер ЭДС термопар.

Обработка результатов опыта ведется в следующем порядке.

1. Расшифровываются показания всех термопар (по градуировочным таблицам ХА с учетом температуры холодного спая).

2. На графике (см. рис.3) откладываются результаты показаний. Масштаб температур: в I мм  $1^{\circ}\text{C}$ . Для каждого стержня проводится осредняющая прямая.

3. Графически определяется величина температурного скачка в стыке путем экстраполяции осредняющих прямых до плоскости стыка (пунктирные участки на рис.3).

4. Рассчитываются:

удельный тепловой поток, протекающий через стержни

$$q = -\lambda \text{ grad } t, \quad (2)$$

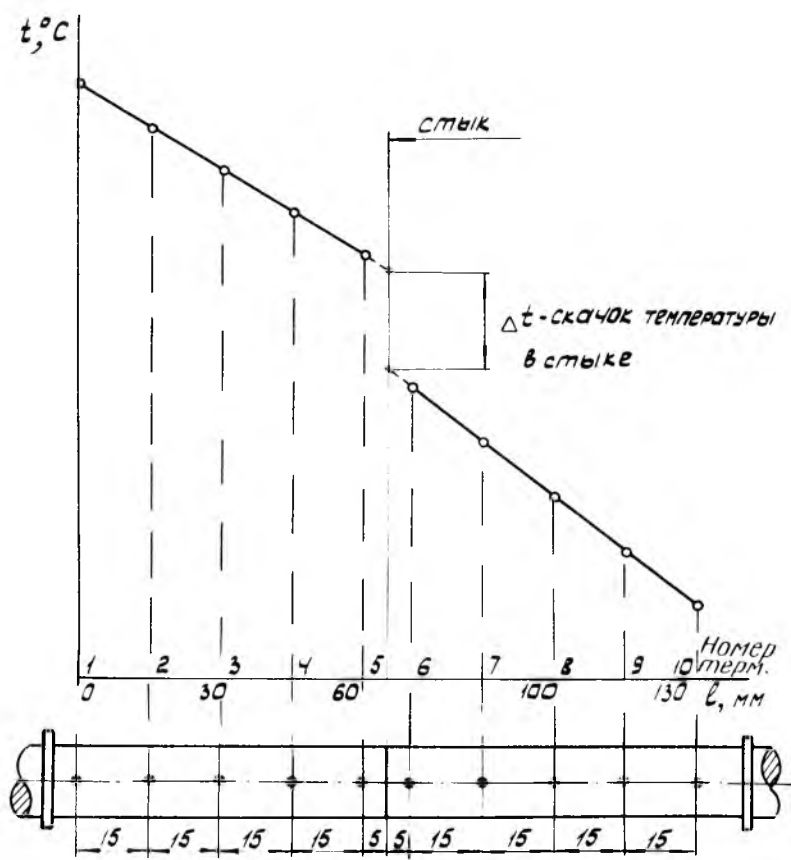
где

$$\text{grad } t = \frac{t_5 - t_1}{\delta}, \quad ^{\circ}\text{C}/\text{м};$$

$\lambda$  - коэффициент теплопроводности верхнего стержня (см.табл.);

$\delta = 0,06 \text{ м}$  - базовое расстояние в метрах между термопарами I и 5;  
термическое сопротивление стыка

$$R = \frac{\Delta t}{R}; \quad (3)$$



Р и с . 3. Распределение температуры по длине экспериментальных образцов

эквивалентное утолщение стенки  $\delta_3^{\wedge}$  за счет термического сопротивления  $R$  :

$$\delta_3^{\wedge} = R \cdot \lambda \cdot 10^3 \text{ (мм)}. \quad (4)$$

#### СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Краткое описание работы.
2. Принципиальная схема установки.
3. Протокол записи показаний измерительных приборов.
4. Обработанные результаты опыта.

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЗАЧЕТУ

1. Что подразумевается под термином "термическое сопротивление"?
2. Как понимать эквивалентность действия стыка дополнительному утолщению стенки  $\delta_3^{\wedge}$ ?
3. Какова физическая природа повышенного термического сопротивления металлических стыков?
4. Какими способами осуществляется перенос тепла в стыке?
5. На какое расстояние от стыка распространяется область резких изменений температурного поля?
6. Объясните порядок выполнения работы.
7. Объясните, что изображено на графике  $t = f(\ell)$ , как изменяется характер этой зависимости при увеличении нагрузки на стыке? Как изменится характер этой зависимости при повышении класса чистоты поверхности?



ПРОТОКОЛ ОПЫТА

Дата испытания \_\_\_\_\_

Номер эксп- пери- мента	G кгс	P МПа	ЭДС термопар и температура стержней										q, $\frac{Вт}{м^2}$	R	$\delta_3$ мм		
			Величина ЭДС	I	2	3	4	5	6	7	8	9				10	
			$E_{изм}$ мВ														
			$E_{х.с}$ мВ														
			$E_{изм} + E_{х.с}$ мВ														
			t, °C														

1. Материал образцов \_\_\_\_\_

2.  $t_{х.с}$  \_\_\_\_\_

Студент \_\_\_\_\_

Преподаватель \_\_\_\_\_

## СО Д Е Р Ж А Н И Е

Лабораторная работа № 1. Определение коэффициента теплопроводности металла . . . . .	3
Лабораторная работа № 2. Определение коэффициента теплопроводности сыпучих материалов . . .	10
Лабораторная работа № 3. Определение термического сопротивления металлических стыков . . . . .	16

Составители: Николай Николаевич Огородников  
Натан Дмитриевич Коляшев

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Лабораторные работы

Редактор М.И.Д о г у н о в а  
Техн.редактор Н.М.К а л е н ю к  
Корректор В.П.П е т р о в а

Подписано в печать 10.10.1983 г.  
Формат 60x84 1/16. Бумага оберточная белая.  
Печать оперативная. Усл.п.л. 1,62. Уч.-изд.л. 1,5.  
Т. 500 экз. Заказ 7250 Бесплатно.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени  
авиационный институт имени академика С.П.Королева,  
г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

Обл. типография имени В.П.Мяги,  
г. Куйбышев, ул. Венцека, 60.