

Министерство образования Российской Федерации
ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет – УПИ»



Э.И. Денисова, А.В. Шак

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НА ИЗМЕРИТЕЛЕ ИТ-λ-400

Учебное электронное текстовое издание
Подготовлено кафедрой «Литейное производство и упрочняющие технологии»
Научный редактор проф. д-р. техн. наук Е.Л. Фурман

Методическое руководство к лабораторной работе для студентов
специальности 110800 – порошковая металлургия, композиционные материалы, покрытия

Методическое руководство для проведения лабораторной работы по измерению теплопроводности на измерителе ИТ-λ-400 содержит: краткие теоретические основы теплопроводности твердых тел, описание устройства и принципы работы прибора ИТ-λ-400, порядок выполнения экспериментальных измерений, математические расчеты теплопроводности и сопутствующих физических величин, необходимые справочные данные, пункты мер безопасности при выполнении данной лабораторной работы. Данное методическое руководство составлено для студентов четвертого курса металлургического факультета специальности 110800 в соответствии с учебными планами.

ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2005

Екатеринбург
2005

1. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Теплопроводность является очень важной технологической и эксплуатационной характеристикой композита.

В изотропном твердом теле распространение тепла подчиняется закону

$$dQ = -\lambda \text{grad}T \frac{dS}{d\tau},$$

где dQ – вектор, величина которого равна потоку тепла, перенесенного через сечение площадью dS , перпендикулярное dQ , за время $d\tau$, T – температура; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(моль К); знак минус связан с тем, что тепло переносится в направлении, противоположном градиенту температуры. В кристалле, который не обладает кубической симметрией, вектор dQ может быть параллелен $\text{grad}T$ и уравнение имеет вид:

$$dQ_i = -\lambda_{ij} \left(\frac{dT}{d\lambda_j} \right) \frac{dS}{d\tau},$$

где λ_{ij} – тензор второго ранга.

Высокая теплопроводность металлических композитов объясняется тем, что перенос тепла в них осуществляется в основном передачей энергии электронами в отличие от неметаллических веществ, где энергия переносится в основном тепловыми колебаниями атомов. Однако соотношение вкладов зависит от конкретных условий состава композита, например, в сверхпроводящих материалах относительные вклады этих механизмов различны в нормальном и сверхпроводящем состояниях. В общем случае теплопроводность является суммой решеточной и электронной теплопроводности $\lambda = a\lambda_{реш} + b\lambda_{электр.}$

При очень низких температурах, близких к абсолютному нулю, теплопроводность λ определяется чистотой металла и формой образца. Она растет с увеличением температуры аналогично теплоемкости. Рост теплоемкости с температурой прекращается, когда становятся заметными процессы рассеивания электронов и уменьшается длина свободного пробега электрона. При дальнейшем повышении температуры теплопроводность падает. Таким образом, зави-

симось λ от T имеет максимум. Положение максимума на зависимости определяется дефектностью материала и соотношением электронного и решеточного вкладов.

Величину решеточной составляющей теплопроводности λ вычисляют по формуле:

$$\lambda_{\text{реш}} = 2.41 a C_v \sqrt{dE}$$

где C_v – молярная теплоемкость; a – межатомное расстояние; d – плотность; E – модуль упругости.

Примеси и поры, содержащиеся в композитах, обычно подавляют электронную компоненту теплопроводности, уменьшая длину свободного пробега электрона, но слабо влияют на решеточную компоненту. Последняя обусловлена главным образом фонон-фононным и электрон-фононным взаимодействием и для композитов в полной теплопроводности определяется точнее, чем в чистых металлах, во-первых, потому, что в композитах она относительно больше, во-вторых, электронную составляющую теплопроводности в композитах можно оценить с большей точностью, используя результаты измерения электропроводности. Самый простой способ определения решеточной теплопроводности чистого металла состоит в экстраполяции результатов измерений для композитов различного состава к нулевой концентрации примесей. Для интерпретации полученных результатов измерения теплопроводности следует использовать данные, характеризующие индивидуальные свойства данного материала. Для металлов с кубической решеткой теплопроводность, так же как и электропроводность, не зависит от кристаллографического направления. Для металлов с некубической решеткой наблюдается анизотропия теплопроводности.

При рассмотрении температурной зависимости теплопроводности металлических композитов необходимо учитывать измерение соотношения между вкладами электронной и решеточной теплопроводности в общее ее значение. При этом для различных металлов отношение меняется неодинаково в зависимости от концентрации и подвижности электронов проводимости. При высоких

температурах ($T > \theta_D$) тепло- и электропроводность уменьшаются с ростом температуры, а при температуре плавления резко падают. Теплопроводность металла зависит от размера зерна и резко падает с его ростом.

В ряду непрерывных твердых растворов теплопроводность понижается с увеличением процента легирующего компонента. Минимум теплопроводности сплавов, как правило, отвечает 50 об.%, а она может быть в несколько раз ниже, чем теплопроводность компонентов. При образовании гетерогенных структур зависимость теплопроводности от объемной концентрации компонентов почти линейна.

Для керамических материалов при температурах выше Дебаевской (высоких) теплоемкость кристалла будет постоянна, а концентрация фононов будет определяться температурой - коэффициент теплопроводности будет обратно пропорционален температуре, что наблюдается на практике. Коэффициент ангармоничности и скорость звука в существенной степени зависят от жесткости связи, действующей между частицами твердого тела. С уменьшением жесткости связи скорость звука уменьшается, а коэффициент ангармоничности увеличивается, так как ослабление связи приводит к возрастанию амплитуды тепловых колебаний (при данной температуре). Оба эти фактора вызывают уменьшение коэффициента теплопроводности, что наблюдается на опыте. В общем случае, теплота сублимации, являющаяся мерой энергии связи, и коэффициент решеточной теплопроводности изменяются синхронно. Более детальный анализ показывает, что теплопроводность керамического материала сильно зависит от массы частиц, уменьшаясь с ростом M .

При температурах ниже Дебаевской концентрация фононов резко уменьшается при понижении T , вследствие чего их длина свободного пробега резко возрастает. Температурная зависимость теплопроводности решетки в этом диапазоне температур определяется зависимостью от T теплоемкости кристалла. Так как в области низких температур теплоемкость определяется T^3 , то и $K_{реш}$ пропорционален T^3 . Из рис.1. видно, что в области низких температур тепло-

проводность существенно возрастает. По мере увеличения температуры растет концентрация фононов, что само по себе приводит к росту $K_{реш}$.

Однако повышение концентрации фононов сопровождается усилением интенсивности фонон-фононного рассеивания и уменьшением длины свободного пробега фононов, что приводит к падению $K_{реш}$. В результате зависимость $K_{реш} = f(T)$ проходит через максимум, после которого $K_{реш}$ обратно пропорционален температуре.

Как уже отмечалось, жесткость связи в кристалле будет в значительной степени определять теплопроводность при постоянных внешних условиях. В свою очередь, жесткость связи в кристалле будет определяться его специфическими свойствами, например, химическим составом, постоянной кристаллической решетки, различного рода нарушениями периодичности решетки и др. Например, в случае оксидов 2 группы периодической системы Д.И. Менделеева, теплопроводность зависит от параметра кристаллической решетки и различия атомных масс кислорода и металла (рис.2.). У оксидов металлов, имеющих атомную массу, близкую к атомной массе кислорода (Be, Mg), эта теплопроводность более высокая, чем у оксидов более тяжелых металлов.

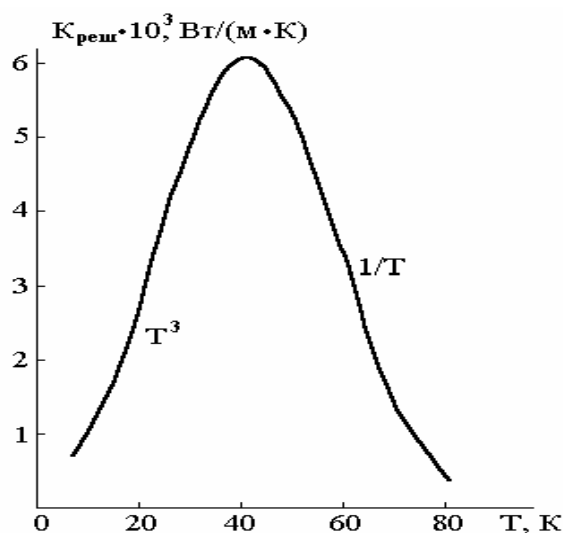


Рис.1. - Зависимость коэффициента теплопроводности сапфира от температуры

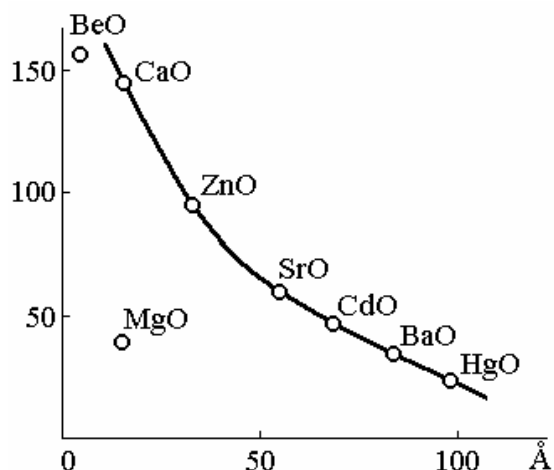


Рис.2. Зависимость коэффициента теплопроводности от параметра кристаллической решетки для спеченных оксидов металлов второй группы периодической системы Д.И. Менделеева

Образование твердых растворов кристаллических фаз, отклонение от стехиометрии или наличие каких-либо дефектов решетки (внедренные атомы, дислокации, границы зерен и др.) приводят к понижению теплопроводности, так как эти дефекты приводят к ослаблению связей в кристаллах и увеличению сечения рассеивания фононов в решетке. Кристаллы, имеющие более совершенное строение решетки, обладают более высокой теплопроводностью.

Наличие пор в керамических материалах вызывает дополнительное понижение теплопроводности. При этом коэффициент теплопроводности может быть приблизительно определен по формуле:

$$\lambda = \lambda_0(1 - P),$$

где λ - средний коэффициент теплопроводности;

λ_0 - коэффициент теплопроводности того же тела, не содержащего пор;

P - объемная пористость.

Из Таблицы 1 видно, что у керамических материалов, содержащих стеклофазу и имеющих кристаллофазу с относительно сложным строением решетки (муллит, фарфор, кварцевое стекло, стабилизированный ZrO_2 и др.), коэффициент теплопроводности достаточно мал. Он также мало меняется с ростом температуры, при этом различие в составе стеклофазы размеров кристаллов долж-

но проявляться незначительно. Важное значение имеет количество стеклофазы в керамических материалах, в меньшей степени - ее состав. Влияние пористости должно проявляться во всех случаях. Введение добавок, как правило, не может рассматриваться, как средство повышения коэффициента теплопроводности основного материала, так как сами по себе добавки могут приводить к образованию дефектов кристаллической структуры основной кристаллофазы материала или образовывать включения новых фаз, что, в общем-то, также нежелательно.

Таблица 1. - Значения коэффициентов теплопроводности различных керамических материалов

| Материал | Коэффициент теплопроводности, Вт/м·град | | Материал | Коэффициент теплопроводности, Вт/м·град | |
|----------------------------------|---|--------|------------------|---|--------|
| | 100°С | 1000°С | | 100°С | 1000°С |
| Al ₂ O ₃ | 30,0 | 6,2 | Муллит | 6,0 | 4,0 |
| BeO | 220,0 | 20,0 | UO ₂ | 10,1 | 3,3 |
| MgO | 36,0 | 7,0 | ZrO ₂ | 1,9 | 2,3 |
| MgAl ₂ O ₄ | 15,0 | 5,8 | Кварцевое стекло | 2,1 | 2,5 |
| ThO ₂ | 6,5 | 3,3 | Фарфор | 1,7 | 1,9 |

(Техническое описание и инструкция по эксплуатации (ТО) предназначены для изучения измерителя теплопроводности ИТ-λ-400 и содержит описание его устройства и принцип действия, технические характеристики, а также сведения, необходимые для эксплуатации.

При изучении измерителя и при его эксплуатации следует дополнительно руководствоваться эксплуатационными документами, входящими в комплект поставки.)

2. НАЗНАЧЕНИЕ

2.1. Измеритель предназначен для исследования температурной зависимости теплопроводности твердых, механически обрабатываемых материалов в режиме монотонного нагрева. Измеритель рассчитан на проведение теплофизических исследований в лабораторных и заводских условиях.

2.2. Условия эксплуатации

| | |
|---|--------------|
| окружающая температура, °С | от 10 до +35 |
| относительная влажность воздуха при температуре 25 °С, % | до 80 |
| атмосферное давление, кПа (мм.рт.ст.) | 650-800 |

3. ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

| | |
|--|-------------------|
| диапазон измерения теплопроводности λ , Вт/(м·К) | от 0,1 до 5 |
| температурный диапазон измерения теплопроводности, °С | -100 до +400 |
| диаметр испытуемого образца, мм | 15±0,3 |
| высота (в зависимости от ожидаемого значения в соответствии с табл. 1.) | от 0,5 до 5 |
| продолжительность измерений во всем температурном диапазоне с обработкой экспериментальных данных, час, не более | 2,5 |
| предел допускаемой основной погрешности измерения теплопроводности, % | ±10 |
| потребляемая мощность, кВт, не более | 1 |
| электропитание сети переменного тока с напряжением | 50 Гц 220±22В; |

4. СОСТАВ ИЗДЕЛИЯ

В состав изделия входит: блок измерительный ПУ.999.067, блок питания и регулирования ПУ2.087.089, микровольтнаноамперметр Ф136, комплект запасных частей, инструмента и принадлежностей в соответствии с ведомостью ЗИП ПУ2899.0013И.

Внешний вид измерителя представлен на рис. 3.

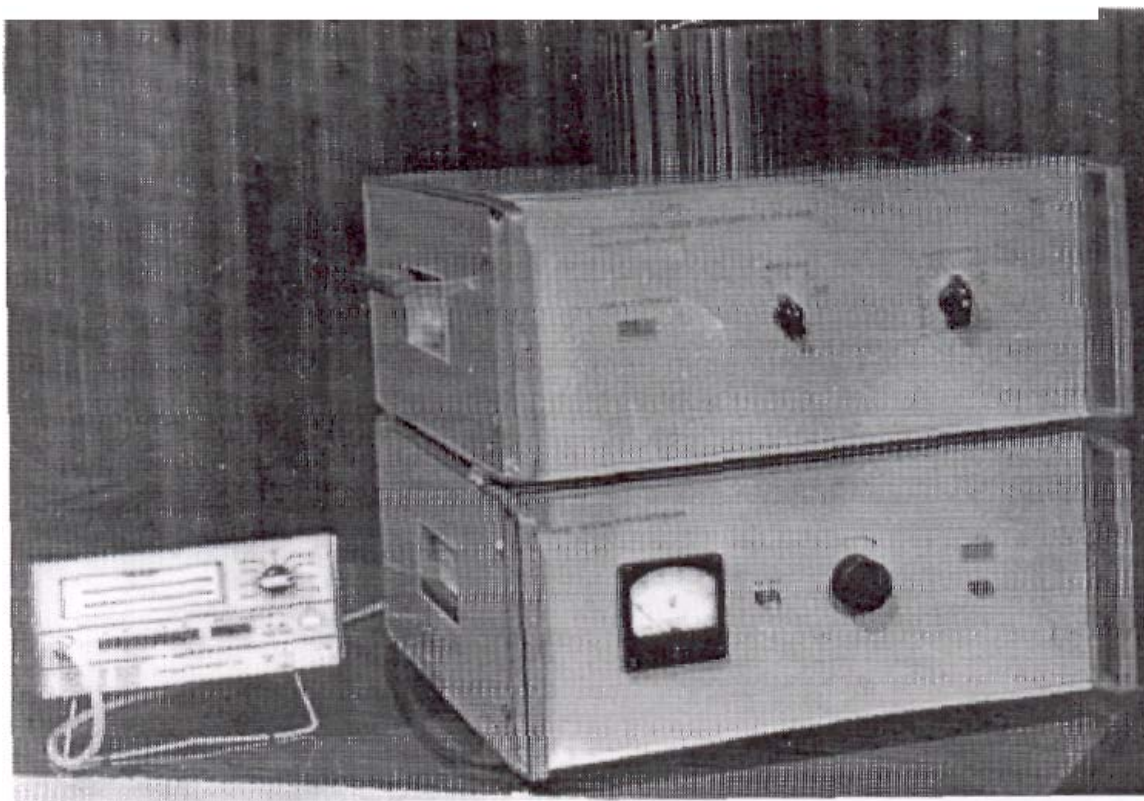


Рис. 3. - Внешний вид измерителя теплопроводности ИТ-λ-400

5. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ

5.1. Физическая основа

Для измерения теплопроводности в измерителе использован метод динамического калориметра, теоретическое обоснование которого подробно изложено в литературе (1) приложения 1.

Тепловая схема метода показана на рис.2.

Образец испытуемый (4), пластина контактная (3) и стержень (5) монотонно разогреваются тепловым потоком $Q(i)$ поступающим от основания (1). Боковые поверхности стержня (5), образца (4), пластины (2), (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 таким образом, 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 близким к скоростям, а для тепловых потоков $Q_o(\tau)$ и $Q_T(i)$ и для любого уровня температуры справедливы формулы:

$$Q_o(\tau) = \frac{v_o S}{P} = \left(\frac{1}{2} C_o + C_c\right) b, \quad (1)$$

где $Q_o(\tau)$ – тепловой поток, проходящий через образец и поглощаемый стержнем, Вт;

b_o - перепад температуры на образце, К;

P - тепловое сопротивление между стержнем и контактной пластиной, (м² К)/Вт;

C_o - полная теплоемкость образца, Дж/К;

C_c - полная теплоемкость стержня, Дж/К;

b - скорость разогрева измерительной ячейки, К/с;

S - площадь поперечного сечения образца, м²;

$$Q_T(\tau) = K_T^* v_T = \left(\frac{1}{2} C_T + C_n + C_o + C_c\right) b, \quad (2)$$

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;

v_T – перепад температуры на пластине (2), К;

C_T – полная теплоемкость пластины (2), Дж/К;

C_n – полная теплоемкость пластины контактной (3), Дж/К;

Тепловое сопротивление между стержнем и контактной пластиной определяется по формуле:

$$P = P_o + P_k, \quad (3)$$

где P_o – тепловое сопротивление образца, $\frac{m^2 K}{Wm}$,

P_k – поправка, учитывающая тепловое сопротивление контакта, неидентичность и тепловое сопротивление заделки термопар, $\frac{m^2 K}{Wm}$.

Тепловое сопротивление образца определяется по формуле:

$$P_o = \frac{h}{\lambda}, \quad (4)$$

где h – высота образца, м;

λ - теплопроводность образца, $\frac{Wm}{mK}$.

На основании формул (1), (2), (3), (4) получены рабочие расчетные формулы для теплового сопротивления образца и его теплопроводности:

$$P_o = \frac{v_0 S (1 + \sigma_c)}{v_T K_T} - P_k, \quad (5)$$

где σ_c – поправка, учитывающая теплоемкость образца;

$$\sigma_c = \frac{C_o}{2(C_o + C_c)}, \quad (6)$$

где C_o – полная теплоемкость испытуемого образца, Дж/(кг К);

C_c – полная теплоемкость стержня, Дж/К;

$$C_o = C_o(t) m_o, \quad (7)$$

где $C_o(t)$ – ориентировочное значение удельной теплоемкости образца, Дж/(кг К),

m_o – масса образца, кг;

$$C_c = C_m(t)m_c, \quad (8)$$

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:

$$K_T = K_T^* \frac{C_c}{0.5C_T + C_n = C_c}, \quad (9)$$

$$\lambda = \frac{h}{P_0}, \quad (10)$$

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

$$\bar{t} = t_c + 0,5A_t n_o, \quad (11)$$

где \bar{t} – средняя температура образца, °С; t_c – температура, при которой проводилось измерение теплопроводности, °С; A_t – чувствительность термопары хромель-алюмель, К/мВ; n_o – перепад температуры на образце, мВ.

Параметры K_T и P_k не зависят от свойств испытуемого образца, являются «постоянными» измерителя. Значения P_k обычно дано для материала с $\lambda = 2 \div 5 \text{ Вт}/(\text{м К})$ и не превышают 10-20% теплового сопротивления образца.

Определение K_T и P_k проводится в градуировочных экспериментах с образцовой мерой из кварцевого стекла и образцом из меди, входящим в комплект поставки. Для определения теплопроводности испытуемого образца в эксперименте необходимо на различных уровнях температуры измерять перепады температуры на тепломере v_T и образце v_o – в микровольтах, МкВ, n_T и n_o .

5.2. Работа измерителя

Измеритель 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 обеспечивающий 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 Ф136 (в микровольтах) измеряется перепад температур на образце Π_0 и пластине Π_T тепломера.

Охлаждение измерительной ячейки в области отрицательных температур (до минус 150°С) производится жидким азотом ГОСТ 9293-74.

5.3. Устройство и работа составных частей

5.3.1. Описание конструкции измерительного блока

Измерительный блок собран в корпусе, изготовленном на базе типового каркаса «Надел-75». Боковые и верхняя крышки каркаса легко снимаются, что обеспечивает доступ внутрь блока. На двух угольниках, прикреплённых к корпусу винтами, установлена плата, которая несет на себе измерительную ячейку. Нижняя часть измерительной ячейки закреплена на плате планками. Верхняя часть измерительной ячейки установлена на той же плате с помощью направляющей и штанги, которая имеет шпоночный паз и фрезерованную канавку для подъема и бокового поворота. Это позволяет при смене испытуемого образца поднять и повернуть в сторону на 90° верхнюю часть измерительной ячейки. Для подъема служит упор. В специальном кожухе установлены ИПСЗ-02, со-

единительная колодка и мост сопротивлений. Кожух предохраняет их от прямого воздействия холодных паров азота. На передней панели блока расположены рукоятки управления и сигнальная лампа регулятора температуры, а на задней трубка выхода азота, электрический разъем, клемма «ЗЕМЛЯ» и розетка подключения микровольтнаноамперметра Ф136. Ячейка измерительная (рис. 3) является важнейшей частью измерительного блока и состоит из корпуса 9, разъемной теплозащитной оболочки (10) и металлического ядра (детали (1), (2), (3), (4), (11), (13), (14)). Корпус (9) состоит из 2-х частей, снабжен рёбрами для интенсификации теплообмена на его поверхности (на рис 3 не показаны). Нижняя часть корпуса закреплена на верхней горизонтальной плате измерительного блока, верхняя часть - на подъёмно - воротном штанговом механизме. Блок нагревательный (14) и колпак охранный (4) снабжены системой отверстий. Через патрубки (8) и (15) осуществляется подача жидкого азота при охлаждении ядра в область отрицательных или комнатных температур. Система отверстий в нагревательном блоке (14) и охранным колпаке (4) обеспечивает достаточно равномерное охлаждение всего ядра в целом.

На медном основании (13) размещены термопары (3), пластина (1), контактная пластина (2), составляющие тепломер, и испытуемый образец (12). Основание (13) и блок нагревательный (14) соединены винтами и специальной крестообразной деталью крепятся к нижней половине корпуса измерительной ячейки. Крестовины (на рис. 3 не показаны) используются для вывода концов термопар и нагревателей. Охранный колпак (4) с помощью аналогичной детали крепится к верхней части корпуса. Для температурных измерений использованы хромель-алюмелевые термопары с диаметром электродов 0,2 мм. Электроды изолированы в горячей зоне ядра керамическими двухканальными трубками диаметром около 1 мм. Последние для повышения механической прочности армированы трубками из нержавеющей стали.

Испытуемый образец (12) устанавливается на пластину контактную (2) и сверху поджимается стержнем (11), прижимом (6) и пружиной (7). Тепломер

смонтирован в медном основании (13). Рабочим слоем термометра является пластина (1) из нержавеющей стали 12Х18Н9Т.

Для увеличения теплового сопротивления и снижения теплоемкости в пластине предусмотрены отверстия и канавки. Основание (13), пластины (1) и (2) спаяны друг с другом и снабжены шестиспайным термостолбиком из хромеля и алюмеля. Для установки термостолбика в основании (13) и пластинах (1) и (2) предусмотрены отверстия.

Для охлаждения ядра измерительной ячейки жидким азотом служит бачок с теплоизолированными стенками. При установке бачка с азотом на верхнюю половину корпуса измерительной ячейки в нем открывается канал по которому происходит поступление азота внутрь измерительной ячейки.

5.3.2. Описание принципиальной электрической схемы измерительного блока

Электроизмерительная схема включает упрощенный потенциометр - мост R6-R33, термопары $T_{п1}-T_{п5}$, ряд переключателей B_1, B_2 . Свободные концы термопар $T_{п1}-T_{п5}$ подключаются к клеммам соединительной колодки Π_2 . Прибор Ф136 ТУ25-04-2398-74 используется непосредственно для измерения сигналов дифференциальных термопар, а также как нуль-прибор в потенциометре. Потенциометр рассчитан на определенные значения термо-э.д.с., соответствующие фиксированным уровням температур от минус 125 до плюс 400°С через 25°С.

Для компенсации изменения температуры колодки Π_2 в плечо моста включено медное сопротивление R6. Мост питается от стабилизированного источника ИПСЗ-0,2.

Температурный переключатель B_1 имеет 4 положения t_c : Π_0 ; Π_T ; УСТ О.

В положениях Π_0 и Π_T с помощью прибора Ф136 измеряется перепады температуры на образце и рабочем слое тепломера (в микровольтах, мкВ). В положении t_c потенциометром измеряется температура стержня, в положении

УСТ О проверяется механический нуль прибора Ф136. Колодки Ш₁, Ш₂, Ш₄, Ш₅ предназначены для подключения в схему нагревателей Э₁, Э₂. Разъем Ш₃ предназначен для соединения измерительного блока с блоком питания и регулирования.

5.3.3. Описание конструкции блока питания и регулирования

Конструкция блока питания и регулирования включает в себя целый ряд унифицированных деталей. Основой конструкции блока служат металлические платы, на которых собраны и смонтированы все функциональные элементы схемы.

Верхняя часть кожуха, как и в измерительном блоке, является съёмной, что обеспечивает свободный доступ ко всем элементам схемы. Крепление обеих частей кожуха аналогично измерительному блоку. На передней панели установлены: вольтметр, кнопки, сигнальная лампа и рукоятки для установки начального напряжения.

На задней панели установлены: разъем, держатель с предохранителем на 5 А и сетевой шнур с вилкой.

На плате размещены: лабораторный автотрансформатор с редуктором и элементы системы регулирования.

Редуктор с передаточным отношением 1/600 приводится в движение электрическим двигателем РД-09 и служит для плавного увеличения напряжения снимаемого с лабораторного автотрансформатора. Возвращение движка автотрансформатора в исходное положение осуществляется вручную за счет поворота рукоятки против часовой стрелки. При этом необходимо оттянуть рукоятку на себя для расцепления зубчатого привода.

5.3.4. Описание принципиальной электрической схемы блока питания и регулирования

При нажатии кнопки В₁ «СЕТЬ» напряжение 220 В подается на лабораторный автотрансформатор Тр₁ и загорается лампа Л₁. Вольтметром ШП фикс-

сируется напряжение, установленное на Tr_1 . При нажатии кнопки B_2 «НАГРЕВ» напряжение от лабораторного автотрансформатора Tr_1 подается на нагреватель \mathcal{E}_2 измерительной ячейки. Одновременно включается двигатель M_1 , равномерно перемещающий движок автотрансформатора. Для ограничения перемещения движка на оси автотрансформатора установлен кулачок, разрывающий цепь питания двигателя M_1 концевым микропереключателем B_3 .

Автоматический регулятор температуры собран на базе серийного усилителя \mathcal{E}_1 . Сигнал дифференциальной термопары поступает на вход усилителя и в зависимости от знака разбаланса заставляет поворачиваться в ту или иную сторону или замыкается контакт микропереключателя B_4 . При замкнутом контакте напряжение подается на нагреватель \mathcal{E}_1 охранного колпака (адиабатической оболочки). Двухпозиционное регулирование позволяет на протяжении всего эксперимента поддерживать равными температуры стержня и адиабатической оболочки с погрешностью около 0,3 К. Для уменьшения наводок цепь дифференциальной термопары проходит в экране. Соединение блока питания и регулирования с измерительным блоком осуществляется соединительным кабелем через разъем $Ш_2$.

6. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ЭКСПЕРИМЕНТА

6.1. Измерение теплопроводности производится на образцах, изготовленных в соответствии с рис. 4 и таблицей 6.

ПРИМЕЧАНИЕ: I. Отклонение от размеров, формы и шероховатости поверхностей, указанных на рис. 4 приводит к увеличению погрешности измерений.

II. Если нельзя классифицировать исследуемый материал (неизвестно ориентировочно значение его теплопроводности), то для выбора оптимальной высоты образца следует провести предварительный эксперимент (до 100°C) с образцом 2-2,5 мм.

Если в эксперименте сигнал превышает 600 мкВ, Ф136, необходимо уменьшить высоту образца до 1 мм, а если сигнал меньше 300 мкВ, то высоту образца следует увеличить до 4-5 мм.

Плоские поверхности образцов должны либо притираться шлифовальным порошком на контрольной плите, либо обрабатываться на плоскошлифовальном станке до шероховатости поверхности не хуже $R_z 0,63$, фаски на кромках дисков не допускаются.

6.2. Шероховатость контактных поверхностей образца, тип смазки, скорость разогрева и давление на образец во всех экспериментах должны быть одинаковы. От качества подготовки испытуемого образца зависит погрешность измерений.

6.3. Для улучшения теплового контакта образцов используется теплоустойкая смазка ПФМС-4 ТУ6-02-917-74. Для образцов, впитывающих смазку можно использовать графитовый порошок ГОСТ 8295-73 или алюминиевую пудру ГОСТ 5494-71. Все градуировочные эксперименты по определению R_k проводятся также с одной из этих смазок.

6.4. Для регистрации основных параметров образца и результатов эксперимента рекомендуется таблица 7.

6.5. Следует помнить, что плавление испытуемого образца может привести к выходу измерителя из строя.

6.6. Расход жидкого азота для охлаждения измерительной ячейки в область отрицательных температур (минус 125 - минус 150°C) 3-4 литра.

6.7. Охлаждение измерительной ячейки после проведения эксперимента до комнатной температуры допускается проводить с помощью бытового электровентилятора ГОСТ 7402-74.

7. МЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ

7.1. К работе с измерителем допускаются лица, ознакомленные с общими правилами техники безопасности, относящимися к эксплуатации электрооборудования с рабочим напряжением до 1000 В. (Литература в приложение (1)) и инструкциями предприятиям по технике безопасности при работе с жидким азотом.

7.2. Запрещается работа измерителя при отсутствии защитного заземления.

7.3. Питание измерителя осуществляется от сети переменного тока напряжением 220В, поэтому при проведении ремонтных работ необходимо помнить, что жидкий азот имеет температуру, близкую к минус 200°С поэтому при обращении с ним должна соблюдаться осторожность. Опасность заключается в том, что попадание жидкого азота на незащищённые участки кожи приводит к ожогам. При работе должны соблюдаться следующее правила:

7.3.1. Перелив жидкого азота из транспортировочного сосуда Дьюара производить через горловину, медленно наклоняя сосуд.

Погрузка, перенос сосудов должны осуществляться обслуживающим персоналом в количестве не менее двух человек.

Отверстие транспортировочного сосуда Дьюара для залива должно быть закрыто специальной крышкой, прикреплённой на цепочке к горловине.

Запрещается затыкать отверстие транспортировочного сосуда Дьюара.

Запрещается ставить сосуд Дьюара вблизи подогреваемых поверхностей, а также на прямые солнечные лучи, оставлять на открытом воздухе.

7.4. Необходимо помнить, что разогрев измерительной ячейки производится до температуры плюс 400°С, поэтому после эксперимента недопустимо прикосновение к внутренним частям измерительной ячейки. Смену исследуемого образца производить только после охлаждения деталей измерительной ячейки до комнатной температуры.

8. ПОРЯДОК УСТАНОВКИ

8.1. Место установки измерителя должно обеспечивать удобство обслуживания.

8.2. Место установки не должно подвергаться воздействию вибрации, а также внешнего электрического и магнитного полей (кроме магнитного поля Земли).

8.3. После распаковки измеритель следует поместить в помещение с температурой от 10 до 35°C и относительной влажностью воздуха до 80% на 6 часов, чтобы он прогрелся и просох. Только после этого измеритель может быть введен в эксплуатацию.

8.4. Недопустимо наличие в воздухе примесей аммиака, сернистых и других агрессивных газов, вызывающих коррозию.

9. ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

9.1. Соедините блок питания и регулирования с измерительным блоком жгутом, прибор Ф136 с измерительным блоком шнуром, в соответствии с электрической схемой соединений (рис 5).

9.2. Переведите кнопки «СЕТЬ», «НАГРЕВ» в положение ВЫКЛ.

9.3. Подключите блок питания и регулирования и прибор Ф136 к сети 220 В, 50 Гц

9.4. Установите:

переключатель «ИЗМЕРЕНИЕ» в положение УСТ 0; переключатель «ТЕМПЕРАТУРА» в положение 25°C.

9.5. Произвести подготовку микровольтнаноамперметра Ф136 к работе согласно п. 5.3.2. инструкции по эксплуатации на прибор Ф136.

9.6. Замерить высоту и диаметр образца с погрешностью $\pm 0,01$ мм.

9.7. Взвесьте образец с погрешностью $\pm 0,001$ г.

9.8. Занесите полученные об образце данные в табл.2.

Поднимите верхнюю половину корпуса измерительной ячейки.

9.9. Протрите бензином ГОСТ 85С5-57 и нанесите тонкий слой смазки ПФМС-4 ТУ6-С2-917-74 на контактные поверхности стержня, образца, контактной пластины тепломера.

9.10. Образец установите на контактную пластину тепломера, стержень - на иглы термопары.

9.11. Опустите верхнюю половину корпуса измерительной ячейки.

9.12. Включите блок питания и регулирования кнопкой «СЕТЬ».

9.13. Установите по вольтметру начальное напряжение 40 В при работе от 25°С и 20 В при работе от минус 100°С.

10. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

10.1. Установите переключатель «ИЗМЕРЕНИЕ» в положение t_c .

10.2. Проведите охлаждение измерительной ячейки (при от минус 100°С), для чего:

налейте в бачок устройства для охлаждения, жидкий азот из транспортировочного сосуда Дьюара (тип АСД-16 ГОСТ 16024-70),

установите бачок на верхний колпак измерительного блока.

Следите по прибору Ф136 в процессе охлаждения за температурой измерительной ячейки, последовательно (от плюс 25 до минус 125°С), проводя переключение рукояткой «ТЕМПЕРАТУРА».

Снимите бачок с колпака измерительного блока через 2-3 минуты после достижения температуры минус 125°С.

10.3. Включите кнопкой «НАГРЕВ» основной нагреватель.

10.4. Снимите показания прибора Ф136 P_0 и P_t , при достижении каждой из температур, указанных в табл.7 (температура стержня достигает ожидаемого значения при прохождении светового указателя прибора Ф136 через нулевую отметку), проводя переключения рукояткой переключателя «ИЗМЕРЕНИЕ»,

занесите значения P_0 и P_t в табл. 7 и переведите переключатель «ИЗМЕРЕНИЕ» в положение t_c .

10.5. Выключите кнопкой «НАГРЕВ» основной нагреватель при достижении верхнего уровня температуры, испытаний.

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

10.7. Зааретируйте прибор Ф136.

10.8. Проведите охлаждение измерительной ячейки до комнатной температуры.

10.9. Выключите блок питания и регулирования.

10.10. Проведите расчет теплопроводности в следующей последовательности:

- 1) рассчитайте поправку на теплоемкость образца σ по формуле (6);
- 2) рассчитайте тепловое сопротивление образца P_0 по формуле (5);
- 3) рассчитайте теплопроводность испытуемого образца λ по формуле (10).
- 4) рассчитайте температуру отнесения измерительного значения теплопроводности \bar{t} по формуле (11).

11. ГРАДУИРОВКА ИЗМЕРИТЕЛЯ

11.1. Градуировка измерителя заключается в экспериментальном определении тепловой проводимости тепломера K_T и поправки P_k , которая учитывает контактное сопротивление образца и заделки термопар, динамические погрешности и неидентичность градуировки термопар. При вводе в эксплуатацию измерителя потребитель делает свою градуировку и показания записываются в табл. 1 (паспорт).

11.1.1. Определение тепловой проводимости тепломера.

При определении K_T проводят серию из пяти экспериментов, в которых в качестве образца используют образцовую меру теплопроводности из плавлено-

го кварца марки КВ ГОСТ 15130-69. Экспериментальные данные заносятся в табл.7

Расчет K_m проводится без учета поправки P_k по формуле:

$$K_T = \frac{\Pi_0 \cdot \lambda}{\Pi_t \cdot h} \cdot S(1 + \sigma_c), \quad (12)$$

где Π_0 - перепад температур на образце в микровольтах, мкВ; Π_t - перепад температуры на рабочем слое тепломера в микровольтах, мкВ.

11.1.2. Определение теплового сопротивления контакта.

При определении P_k проводят серию экспериментов с образцом из меди (диаметр образца 15 мм, высота - 5 мм).

Экспериментальные данные заносят в табл. 7. Расчет P_k проводят по формуле:

$$P_k = \frac{\Pi_0 \cdot S}{\Pi_T \cdot K_T} (1 + \sigma_c) - \frac{h_M}{\lambda_M}, \quad (13)$$

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

Значение теплопроводности λ_M в зависимости от температуры приведены в приложении 2.

11.1.3. Уточнение K_T .

Проводят уточнённый расчет K_T с учетом среднего значения P_k по формуле:

$$K_T = \frac{\lambda \cdot \Pi_0}{h \cdot \Pi_T} \cdot S(1 - \sigma_k + \sigma_c), \quad (14)$$

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 теплоёмкость образца из кварца марки КВ; σ_k - поправка, учитывающая тепловое сопротивление P_k .

$$\sigma_k = P_k \cdot \frac{\lambda}{h}, \quad (15)$$

Среднее из вычисленных значений K_T используют при дальнейшей работе.

11.1.4. Расчёт погрешностей определения K_T и P_K .

Погрешности определения K_T и P_K являются случайными. Величины их зависят от квалификации и опыта экспериментатора не должны превышать соответственно 5% и 10%.

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

$$\Delta(\bar{K}_T) = \frac{t_p \sigma_{KT}}{\bar{K}_T}, \quad (16)$$

где: $\Delta(\bar{K}_T)$ – случайная погрешность определения тепловой проводимости тепломера; t_p - коэффициент Стьюдента (для $n=5$ $t_p=2,78$ при доверительной вероятности $P=0,95$).

$$\tilde{\sigma}_{\bar{K}_T} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_{Ti} - \bar{K}_T)^2}{n(n-1)}}, \quad (17)$$

где: $\tilde{\sigma}_{\bar{K}_T}$ среднеквадратическое отклонение тепловой проводимости тепломера Вт/К ; n - число измерений ($n=5$); \bar{K}_T - среднее значение проводимости тепломера, Вт/К.

$$\bar{K}_T = \frac{\sum_{i=1}^5 K_{Ti}}{5} \quad (18)$$

Расчет погрешности определения P_K проводится по формулам:

$$\Delta(\bar{P}_K) = \frac{t_p \cdot \tilde{\sigma}_{P_K}}{\bar{P}_K}, \quad (19)$$

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

$$\tilde{\sigma}_{\bar{P}_K} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (P_{Ki} - \bar{P}_K)^2}{n(n-1)}}, \quad (20)$$

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

$$\bar{P}_K = \frac{\sum_{i=1}^5 P_{Ki}}{5}, \quad (21)$$

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

12. ПРОВЕРКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

12.1. Проверка технического состояния заключается в проведении контрольных градуировочных экспериментов в соответствии с разделом 13 не реже одного раза в 3 месяца и определении предела допускаемой основной погрешности измерений.

12.2. Определение предела допускаемой основной погрешности.

12.2.1. Определение случайной составляющей погрешности.

В соответствии с разделом 12 проводят пять экспериментов с образцовой мерой из оптического стекла ТФ1 ГОСТ 13659-68 (до $t_c=200^\circ\text{C}$) или органического стекла ГОСТ 7622-72 (до $t_i=50^\circ\text{C}$). Результаты измерений обрабатывают следующим образом.

Если одно из значений λ_i резко отличается от остальных, необходимо проверить, не является ли оно промахом. Для этого определяют параметры: r

$$r = \frac{(\lambda_i - \bar{\lambda})}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (\lambda_i - \bar{\lambda})^2}{n(n-1)}}}, \quad (22)$$

где: λ_i - измеренные значения теплопроводности, Вт/(м·К);

$\bar{\lambda}$ - среднее арифметическое значение теплопроводности, Вт/(м К); n - количество экспериментов, $n=5$.

Если значение r больше 1,67, то λ_i из дальнейшего расчета должно быть исключено и проведено еще одно измерение теплопроводности.

Находят среднее из измеренных значений теплопроводности (для точек минус 100°, 0°, плюс 100°, плюс 100°С при измерениях с оптическим стеклом ТФ₁ и минус 100°, минус 50°, 0°, плюс 50°С при измерениях с органическим стеклом) по формуле:

$$\bar{\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{n} \quad (23)$$

Затем проводят оценку среднеквадратического отклонения

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\lambda_i - \bar{\lambda})^2}{n(n-1)}} \quad (24)$$

Расчет случайной составляющей погрешности проводят по формуле:

$$\Delta^0 = \frac{\tilde{\sigma} \cdot t_p}{\bar{\lambda}} \cdot 100, \quad (25)$$

где Δ^0 - случайная составляющая; t_p - коэффициент Стьюдента (для $n=5$ $t_p=2,78$ при доверительной вероятности $P=0,95$).

12.2.2. Определение систематической составляющей погрешности.

Систематическую составляющую погрешности рассчитывают для тех же точек температурного диапазона, что и случайную по формуле:

$$\Delta_C^0 = \frac{\bar{\lambda} - \lambda_0}{\lambda_0} \cdot 100, \quad (26)$$

где Δ_C^0 - систематическая составляющая погрешности, %; λ_0 - значение теплопроводности образцовой меры по свидетельству государственной поверки, взятое при температуре, при которой определяется теплопроводность, Вт/(м·К).

12.2.3. Определение предела допускаемой основной погрешности проводят по формуле:

$$\Delta = \Delta_C^0 \pm \Delta^0, \quad (27)$$

где Δ^0 - предел допускаемой основной погрешности, %.

Таблица 2 - Постоянные измерителя, полученные при градуировке

| Температура, °С | $P_K \times 10^{-4}$ (м ² ·К)/Вт | C_C , Дж/К | $C_M(t)$, Дж/К | K_T , Вт/К |
|-----------------|--|--------------|--------------------|--------------|
| -100 | 6,2 | 15,0553 | 345 | 0,1409 |
| -50 | 5,4 | 15,9323 | 365 | 0,1460 |
| 0 | 5,5 | 16,4124 | 376 | 0,1326 |
| 50 | 5,2 | 17,1108 | 392 | 0,1350 |
| 100 | 4,6 | 17,4600 | 400 | 0,1405 |
| 150 | 4,6 | 17,6783 | 405 | 0,1366 |
| 200 | 4,6 | 17,8092 | 408 | 0,1330 |

Обозначение символов табл. 2:

P_K - поправка, учитывающая тепловое сопротивление контакта, неидентичность и сопротивление заделки термопар; C_C - полная теплоемкость стержня; $C_M(t)$ – теплоемкость меди; K_m - тепловая проводимость пластин тепломера.

Результаты измерения теплопроводности образцовых мер из оптического бесцветного стекла марки ТФ1 ГОСТ 13669-68 и органического стекла по ГОСТ 17622-72. представлены в таблице 3.

Таблица 3. - Зависимость теплопроводности стекол от температуры

| Теплопроводность, Вт/(м·К) | | |
|----------------------------|------|---------------------|
| температура, °С | ТФ1 | Органическое стекло |
| 1 | 2 | 3 |
| -100 | 7,01 | 2,55 |
| 1 | 2 | 3 |
| -50 | 7,52 | 1,01 |
| 0 | 8,94 | 6,23 |
| 50 | 6,79 | 8,38 |
| 100 | 7,18 | |
| 150 | 3,81 | |
| 200 | 3,72 | |

Таблица 4 - Выбор высоты образца в зависимости от ожидаемого значения теплопроводности

| | | | | | |
|-----------------------|---------|---------|---------|-------|---------|
| λ , Вт/(м К) | 0.1-0.3 | 0.3-0.5 | 0.5-1.0 | 1.0-2 | более 2 |
| $h \cdot 10^{-3}$, м | 0.5-1.0 | 1-2 | 2-3 | 3-5 | более 5 |

h = ...

d = ...

S = ...

m = ...

Таблица 5 - Основные параметры образца и результаты эксперимента

| t_c | n_0 , дел | n_t , дел | K_T Вт/К | P_K | P_0 | C_c , Дж/К | σ_c | A_t | t | λ , Вт/(м К) |
|-------|----------------|----------------|---------------|-------|-------|-----------------|------------|-------|-----|-------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| -100 | | | | | | | | | | |
| -75 | | | | | | | | | | |
| -50 | | | | | | | | | | |
| -25 | | | | | | | | | | |
| 0 | | | | | | | | | | |
| 25 | | | | | | | | | | |
| 50 | | | | | | | | | | |
| 75 | | | | | | | | | | |
| 100 | | | | | | | | | | |
| 125 | | | | | | | | | | |
| 150 | | | | | | | | | | |
| 175 | | | | | | | | | | |
| 200 | | | | | | | | | | |
| 225 | | | | | | | | | | |
| 250 | | | | | | | | | | |
| 275 | | | | | | | | | | |
| 300 | | | | | | | | | | |
| 325 | | | | | | | | | | |
| 350 | | | | | | | | | | |
| 375 | | | | | | | | | | |
| 400 | | | | | | | | | | |

Обозначения символов таблицы 4

h - высота исследуемого образца, м; d - диаметр исследуемого образца, м; S - площадь поперечного сечения исследуемого образца, м²; m - масса исследуемого образца; t_c - температура стержня, °С; n_0 - перепад температуры на образце в микровольтах; n_t - перепад температуры на рабочем слое тепломера в микровольтах; K_m - тепловая проводимость тепломера, Вт/К; P_K - контактное тепловое сопротивление, (К м)/Вт; C_c - полная теплоемкость стержня, Дж/К; σ_c - поправка на теплоемкость образца; A_t - чувствительность термопары, (К/мВ)±20; t - средняя температура образца, °С; λ - теплопроводность исследуемого образца, Вт/(м·К).

Примечание: значение K_T , P_K , C_C являются постоянными прибора и определяются при его градуировке.

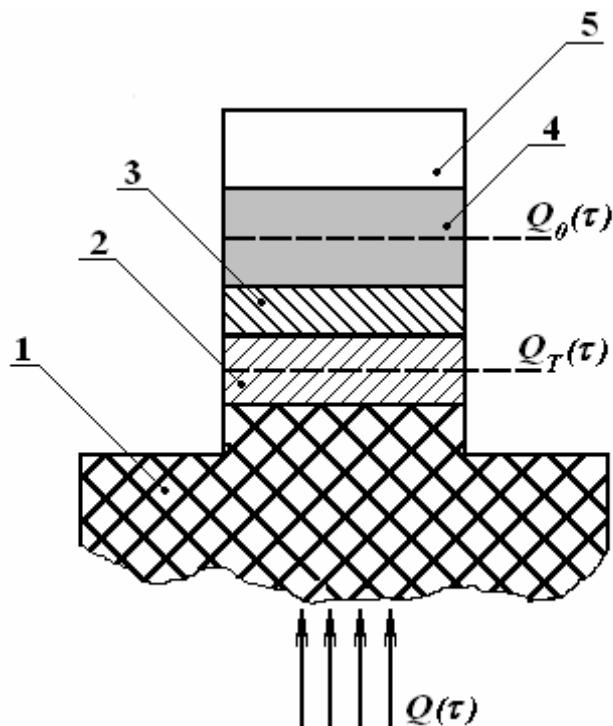


Рис.4. - Тепловая схема метода: 1 – основание; 2 – пластина; 3 – пластина контактная; 4 – испытуемый образец; 5 - стержень

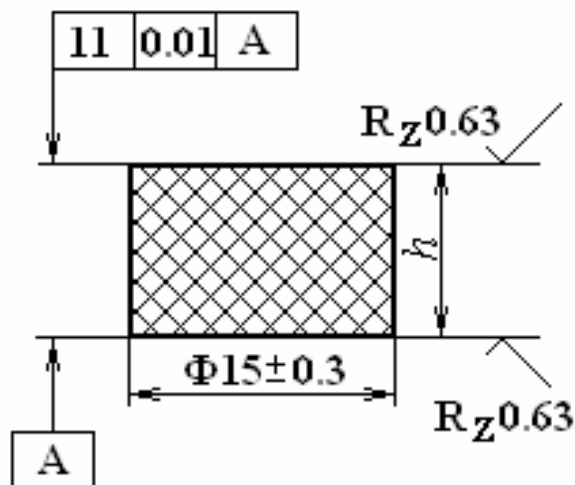


Рис. 5. – Чертеж образца

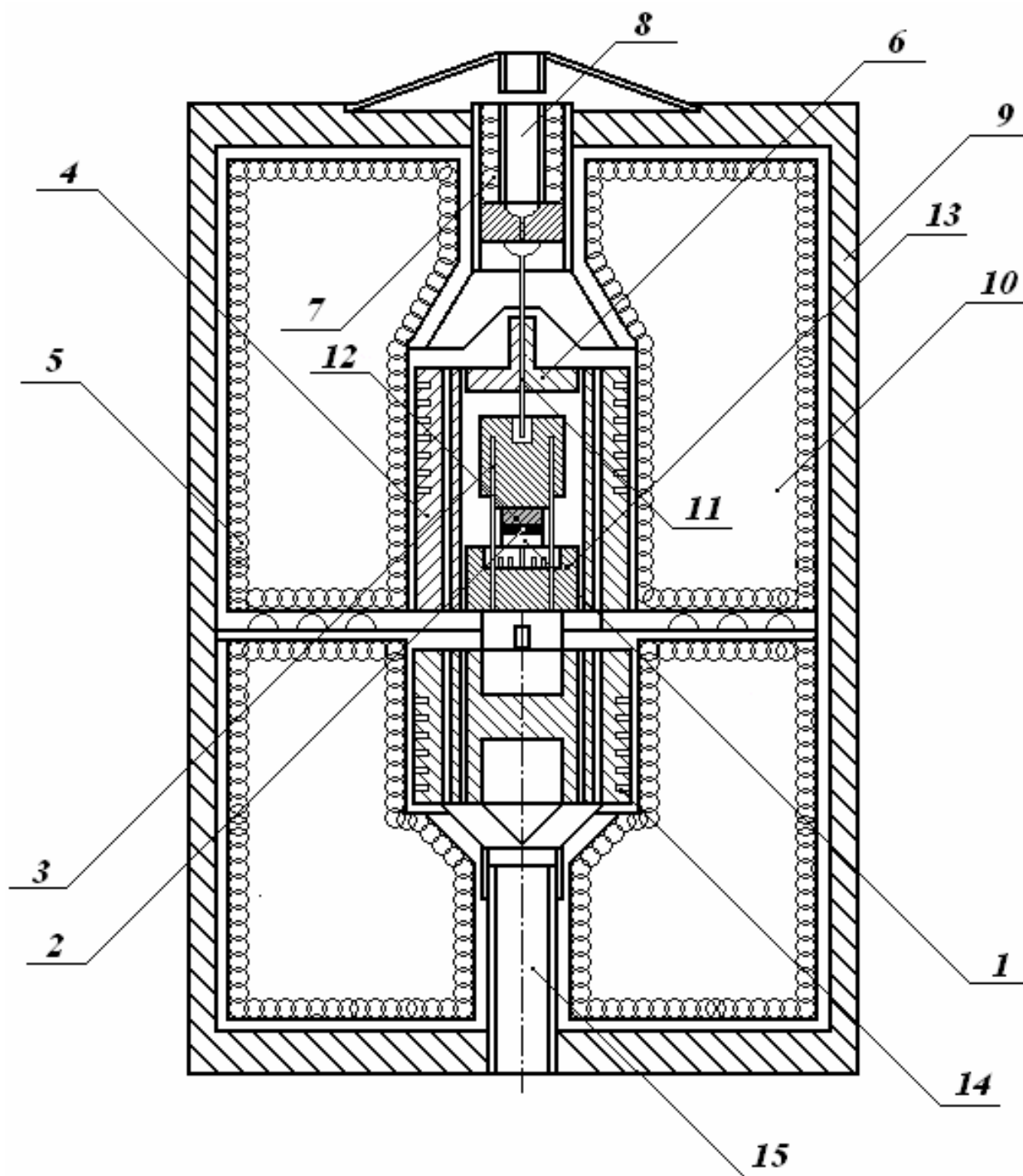


Рис. 6. Измерительная ячейка: 1 - пластина; 2 - пластина контактная; 3 - термопара; 4 - колпак охранный; 5 - коробка из фольги; 6 - прижим; 7 - пружина; 8 - патрубок; 9 - корпус; 10 - оболочка теплозащитная; 11 - стержень; 12 - образец испытуемый; 13 - основание; 14 - блок нагревательный; 15 – патрубок

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица 6. - Данные, необходимые при эксплуатации измерителя

| $t_c, ^\circ\text{C}$ | $C_M, \text{Дж}/(\text{кг К})$ | $\lambda_M, \text{Вт}/(\text{мК})$ | $A_t, \text{К}/\text{мВ}$ |
|-----------------------|--------------------------------|------------------------------------|---------------------------|
| -100 | 345 | 407 | 37.8 |
| -75 | 385 | 401 | 32.5 |
| -50 | 365 | 395 | 29.0 |
| -25 | 373 | 390 | 26.8 |
| 0 | 376 | 387 | 25.0 |
| 25 | 385 | 384 | 24.8 |
| 50 | 392 | 381 | 24.5 |
| 75 | 396 | 379 | 24.6 |
| 100 | 400 | 377 | 24.7 |
| 125 | 403 | 376 | 24.8 |
| 150 | 405 | 375 | 25.0 |
| 175 | 406 | 374 | 25.0 |
| 200 | 408 | 373 | 25.0 |
| 225 | 410 | 373 | 24.9 |
| 250 | 412 | 372 | 24.8 |
| 275 | 415 | 372 | 24.5 |
| 300 | 417 | 371 | 24.2 |
| 325 | 420 | 370 | 24.0 |
| 350 | 422 | 368 | 23.8 |
| 375 | 423 | 367 | 22.8 |
| 400 | 425 | 365 | 23.75 |

Обозначение символов табл.

t_c - температура стержня, $^\circ\text{C}$; C_M - удельная теплоемкость меди, $\text{Дж}/(\text{кг К})$;
 λ_M - теплопроводность меди, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; A_t - чувствительность термопары хромель-алюмель, $\text{К}/\text{мВ}$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Шатунов, Е.С.** Теплофизические измерения в монотонном режиме. «Энергия», 1972.
2. **Сергеев, С.А** Метрологические основы теплофизических измерений. «Стандарт», 1972.
3. Правила технической эксплуатации установок потребителей и правила техники безопасности при эксплуатации установок потребителей. «Проминь», Днепропетровск, 1973.
4. **Кингери, У.Д.** Введение в керамику. - М.: Стройиздат, 1964.
5. **Кржижановский, Р.Е., Штерн, З.Ю.** Теплофизические свойства неметаллических материалов. – Л.: Энергия, 1973.

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|-------------------------------------|----|
| 1. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ТВЕРДЫХ ТЕЛ | 2 |
| 2. НАЗНАЧЕНИЕ | 8 |
| 3. ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ | 8 |
| 4. СОСТАВ ИЗДЕЛИЯ | 9 |
| 5. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ | 9 |
| 6. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ | 17 |
| 7. МЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ | 19 |
| 8. ПОРЯДОК УСТАНОВКИ | 20 |
| 9. ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ | 20 |
| 10. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА | 21 |
| 11. ГРАДУИРОВКА ИЗМЕРИТЕЛЯ | 22 |
| 12. ПРОВЕРКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ | 25 |
| 13. ПРИЛОЖЕНИЕ 1 | 32 |
| 14. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК | 33 |

Учебное электронное текстовое издание

Денисова Эльмира Ивановна
Шак Андрей Васильевич

**ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ
НА ИЗМЕРИТЕЛЕ ИТ-λ-400**

Редактор *К.В. Ноговицына*
Компьютерная верстка *А.В. Терещенко*

Рекомендовано РИС ГОУ ВПО УГТУ-УПИ
Разрешен к публикации 29.03.06.
Электронный формат – PDF
Формат 60x90 1/8

Издательство ГОУ-ВПО УГТУ-УПИ
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19
e-mail: sh@uchdep.ustu.ru

Информационный портал
ГОУ ВПО УГТУ-УПИ
<http://www.ustu.ru>