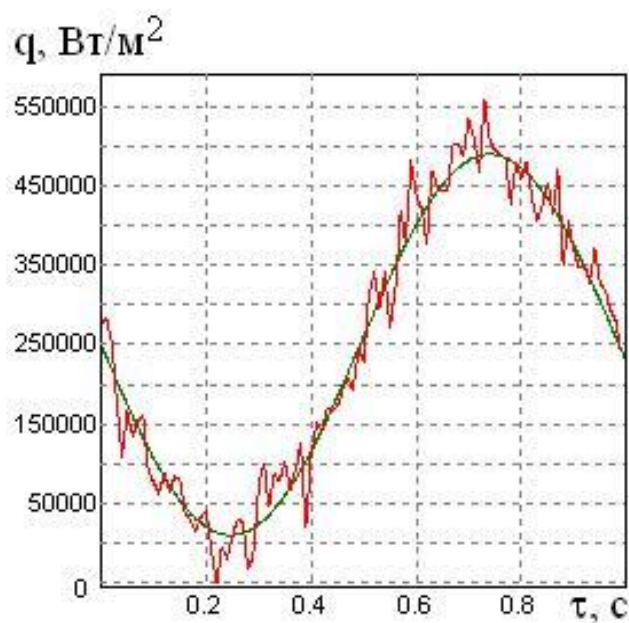


Н.В. Пилипенко

**МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ
ПРИ СТАЦИОНАРНОМ
ТЕПЛООБМЕНЕ**



Санкт-Петербург

2018

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

Н.В. Пилипенко

**МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЧНЫХ
УСЛОВИЙ ПРИ СТАЦИОНАРНОМ
ТЕПЛООБМЕНЕ**

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО
по направлению подготовки 16.03.01 – «Техническая физика» и 14.03.01 –
«Ядерная энергетика и теплофизика» в качестве учебного пособия для реализации
основных профессиональных образовательных программ высшего образования
бакалавриата.

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

Санкт-Петербург

2018

Пилипенко Н.В., Методы и приборы определения граничных условий при стационарном теплообмене. Учебное пособие – СПб: Университет ИТМО, 2018. – 53 с.

Рецензент: Гладских Дмитрий Аркадьевич, кандидат технических наук, ведущий инженер.

Учебное пособие разработано в соответствии с программой курса «Техника теплофизического эксперимента» Федерального образовательного стандарта Министерства высшего образования и науки РФ для бакалавров по направлениям подготовки 16.03.01– «Техническая физика» и 14.03.01 – «Ядерная энергетика и теплофизика».

Учебное пособие включает описание четырёх лабораторных работ. В каждой работе указана цель, дано теоретическое обоснование, описание экспериментальных установок, порядок выполнения работы и контрольные вопросы.

Рекомендовано к печати Ученым Советом факультета низкотемпературной энергетики 2018 года, протокол № 7.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

©Университет ИТМО, 2018

©Пилипенко Н.В., 2018

Оглавление

Лабораторная работа №1	4
Лабораторная работа №2	20
Лабораторная работа №3	28
Лабораторная работа №4	36

Определение граничных условий при стационарном теплообмене

Цель работы – ознакомление с методами и устройствами для определения граничных условий (теплового потока на границе тела) при стационарном теплообмене, а также методом и устройством для задания нормированного теплового потока.

Необходимость измерения тепловых потоков возникает в различных технологических процессах, при эксплуатации энергетических установок, приборов и устройств в исследовательской практике.

Существует большое разнообразие методов, приборов и устройств для решения задачи [1].

Вместе с измерениями потоков актуальной является задача задания нормированного потока, необходимого как для градуировки тепломеров, так и для определения погрешности измерения с помощью различных типов тепломеров.

В лабораторной работе рассматриваются пять типов тепломеров, дано описание стенда для задания нормированного потока, приведена методика определения погрешности измерения.

Рассматриваются тепломер ОРГРЭС, комбинированный тепломер, Альфа-калориметр, тепломер Института технической теплофизики АН УССР, тепломер Гардона.

Методы измерения теплового потока, описание и принцип действия тепломеров

Тепломер ОРГРЭС (Государственный трест по организации и рационализации районных электростанций и сетей) применяется для измерения тепловых потоков на поверхности теплоизоляции в условиях естественной конвекции.

Действие прибора основано на создании в измерительном элементе теплового потока, равного потоку от испытуемой поверхности, с использованием компенсационного метода уравнивания температур элемента и испытуемой поверхности. При этом в момент равенства температур тепловой поток через термическое сопротивление датчика оказывается равным нулю. В то же время конструкция датчика позволяет сохранить неизменным тепловой поток от испытуемой стенки.

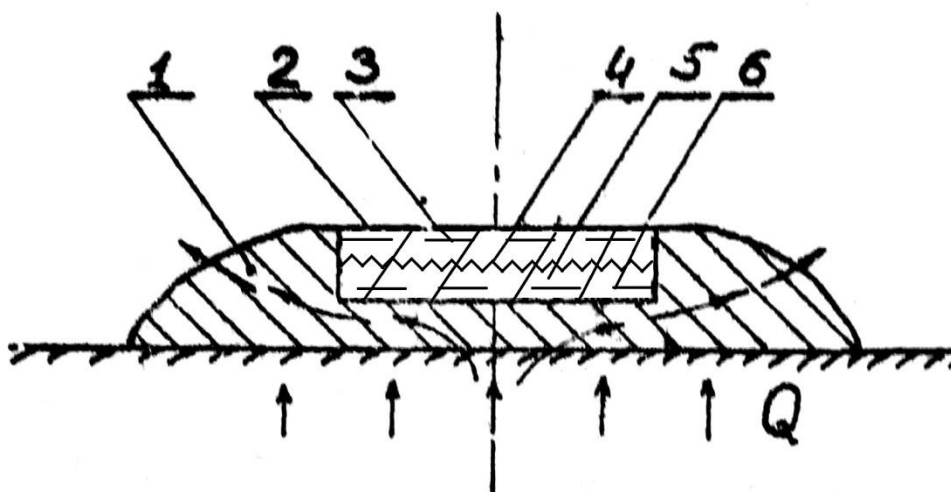


Рисунок 1

Рассмотрим конструкцию тепломера (Рисунок 1). В алюминиевом корпусе 1 расположен измерительный элемент тепломера. Элемент состоит из медной пластинки 2 с термометром сопротивления 3, электрического нагревателя 4, термометра сопротивления 6 на корпусе тепломера. Между нагревателем 4 и термометром 6 установлена теплоизоляционная прослойка 5.

Термометры сопротивления выполнены из медного провода, а нагреватель – из манганина, чтобы его сопротивление не менялось с изменением температуры. Мощность нагревателя, соответствующая верхнему пределу шкал прибора, составляет 0,35 Вт. Термометры сопротивления включены в мостовую измерительную схему. В момент измерения при $R_3=R_6$ ток в измерительной диагонали моста отсутствует, а электрический нагреватель оказывается адиабатически изолированным от корпуса тепломера, следовательно, весь поток рассеивается в среду с поверхности измерительного элемента.

Если контактное термическое сопротивление мало, то температура пластинки элемента равна температуре исследуемой поверхности, и при равенстве коэффициентов теплообмена на обеих поверхностях плотность потока на пластинке тепломера равна плотности измеряемого потока.

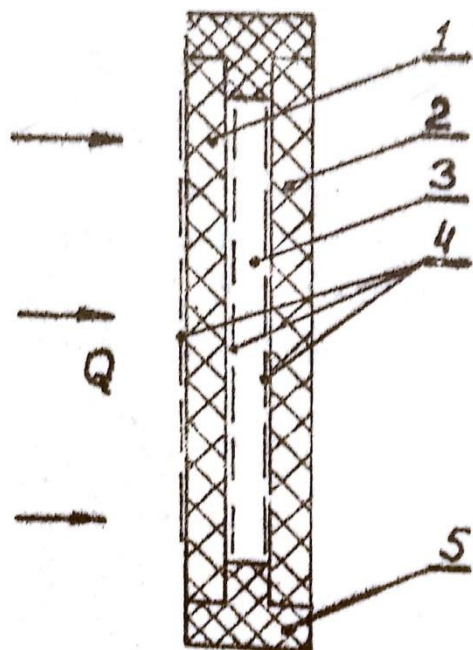


Рисунок 2

Комбинированный ПТП предназначен для измерения тепловых потоков как стационарных, так и переменных. Тепломер состоит из чувствительного элемента 1 и основания 2, разделённых воздушной прослойкой 3 (Рисунок 2). На двух поверхностях чувствительного элемента и на внутренней поверхности основания нанесены плёночные

термометры сопротивления 4. Чувствительный элемент и основание объединены корпусом 5.

Комбинированный ПТП может работать в двух режимах. Первый характерен для тепловых потоков малой длительности (высокой частоты), когда температурные возмущения на тепловоспринимающей поверхности затухают в чувствительном элементе, не доходя до его тыльной стороны. Величина теплового потока определяется по формуле [2]:

$$q(\tau') = \frac{\lambda}{\sqrt{a\pi}} \int_0^{\tau'} \frac{dT}{d\tau} \cdot \frac{d\tau}{\sqrt{\tau' - \tau}}, \quad (1)$$

где λ , a – коэффициенты тепло- и температуропроводности материала чувствительного элемента.

Второй режим отличается наличием теплообмена между чувствительным элементом и основанием. О наступлении второго режима свидетельствует изменение температуры внутренней поверхности чувствительного элемента. Тепловой поток в этом случае определяется по формуле:

$$q(\tau) = \frac{C \cdot dt_v}{S \cdot d\tau} + \alpha(t_{1,S} - t_{2,S}), \quad (2)$$

где t_v – среднеобъёмная температура чувствительного элемента; $t_{1,S}$, $t_{2,S}$ – среднеповерхностные температуры поверхностей чувствительного элемента и оснований, обращенных к воздушному зазору; α – коэффициент теплоотдачи в зазоре; C – полная теплоёмкость чувствительного элемента; S – площадь чувствительного элемента.

В стационарном режиме ($\frac{dt_v}{d\tau} = 0$) формула упрощается:

$$q = \alpha(t_{1,S} - t_{2,S}). \quad (3)$$

Заметим, что коэффициент теплопередачи α является функцией температуры и определяется при $t = \frac{t_{1,S} + t_{2,S}}{2}$.

Альфа-калориметр. Принцип действия такого тепломера заключается в следующем. Вблизи поверхности, на которой измеряется тепловой поток, устанавливается предварительно нагретая пластинка с известной теплоёмкостью. Пластинка охлаждается за счёт теплообмена с исследуемой поверхностью и средой. Уравнение теплового баланса имеет вид:

$$C_T \cdot \frac{dt_T}{d\tau} = \alpha_T \cdot F_T(t_T - t_c) + \alpha_{II} \cdot F_{II}(t_T - t_{II}), \quad (4)$$

где C_T – теплоёмкость пластины тепломера; α_T, α_{II} – коэффициенты теплообмена пластинки (тепломера) и исследуемой поверхности; F_T, F_{II} – поверхности теплообмена пластинки со средой и телом; t_T, t_{II}, t_c – температуры тепломера исследуемой поверхности и среды.

В начале опыта необходимо выполнить условия $t_T > t_{II} > t_c$.

В момент выравнивания температур тепломера и исследуемой поверхности ($t_T = t_{II}$) теплообмен между ними отсутствует, т.е. $\alpha_{II}F_{II}(t_T - t_{II}) = 0$, а рассеиваемый тепломером в среду поток составляет:

$$q_T = \frac{C_T \cdot \frac{dt_T}{d\tau}}{F_T} = A \cdot \frac{dt_T}{d\tau}. \quad (5)$$

Если обеспечиваются условия равенства коэффициентов теплообмена на поверхности тепломера и исследуемой поверхности, то искомый поток определяется по формуле (5).

Таким образом, измерение потока сводится к определению в момент равенства температур $t_T = t_{II}$ скорости охлаждения пластинки.

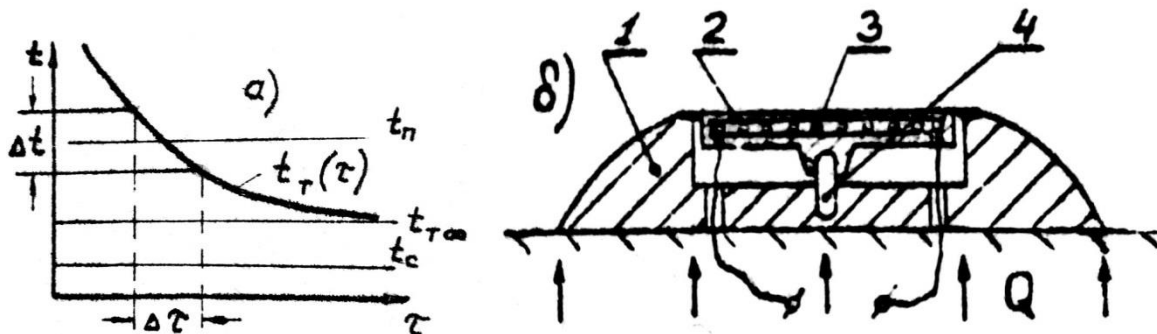


Рисунок 3

Процесс охлаждения показан на рисунке 3,а. Конструкция тепломера изображена на рисунке 3,б. В углублении металлического корпуса 1 размещается пластинка тепломера 2. В пластинке монтируется нихром-константановая термопара 3 диаметром 0,10 мм. Одновременно термопара выполняет ещё и функцию нагревателя. Пластинка крепится к корпусу тонкой эбонитовой шпилькой 4. Тыльная и боковая части пластинки участвуют в теплообмене с корпусом тепломера, а лицевая поверхность – с внешней средой.

В тепломере Института технической теплофизики (ИТТФ) также используется метод вспомогательной стенки (рисунок 4). Он представляет собой последовательное соединение термопар, термоэлектроды которых вытянуты в направлении теплового потока. Термобатарея изготовлена гальваническим способом и содержит около 2000 спаев. Спаи термопар расположены в двух параллельных плоскостях вблизи поверхностей тепломера. Термобатарея скреплена эпоксидной смолой.

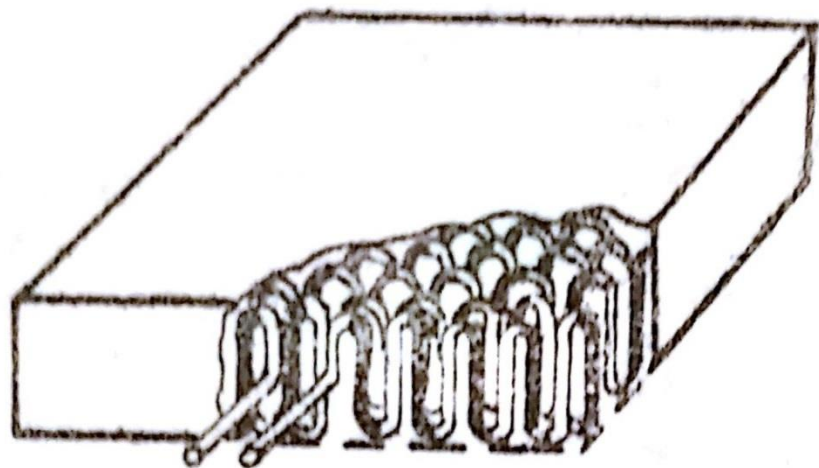


Рисунок 4

Отличительной особенностью тепломера такого типа является вспомогательная стенка, которую образует в нём материал термоэлектродов, и, как следствие этого, они имеют относительно высокую теплопроводность ($\lambda_{эф} = 2...5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$), а большое количество спаев обеспечивают их высокую чувствительность.

Тепломер Гардона. Метод измерения теплового потока, реализуемый в тепломере Гардона (Рисунок 5), базируется на решении осесимметричной задачи теплопроводности о распределении температуры по радиусу тонкого диска с известными температурами в его центре и на максимальном радиусе.

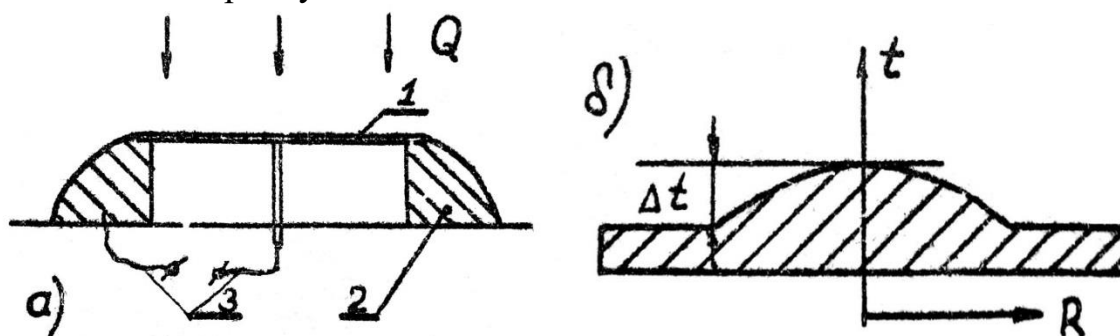


Рисунок 5

Чувствительным элементом датчика (Рисунок 5, а) является тонкий диск 1, изготовленный из термоэлектродного материала (константан). Диск соединен термодиффузией с кольцевой втулкой 2, изготовленной также из термоэлектродного материала (медь). К центру диска и к втулке присоединены термоэлектродные провода (медь) 3. Таким образом, тепломер представляет собой дифференциальную термопару с горячим и холодным спаями, расположенными в центре и на максимальном радиусе.

Локальный тепловой поток, попадающий на диск 1, передается втулке 2, которая поддерживается при постоянной температуре. В результате теплообмена между диском и втулкой температура центра диска будет всегда выше температуры втулки. По величине перепада температур $\Delta t(\tau)$ (Рисунок 5, б) в любой момент времени и судят об интенсивности теплового потока $q(\tau)$.

Расчетная формула для определения $q(\tau)$ при частотах его измерения $\omega = \frac{2a}{\pi R^2}$ имеет вид:

$$q(\tau) = \rho \cdot c \cdot \delta \left[\frac{3}{4} \cdot \frac{dt_{\text{ц}}}{d\tau} + \frac{1}{4} \cdot \frac{dt_R}{d\tau} + \frac{4a}{R^2} (t_{\text{ц}} - t_R) \right], \quad (6)$$

где c , a , ρ – удельная теплоемкость, температуропроводность и плотность материала диска; δ – толщина диска; $t_{\text{ц}}$, t_R – температуры в центре диска и на радиусе R .

Для измерения стационарных потоков q формула (6) значительно упрощается:

$$q = \frac{4a\rho c\delta}{R^2} (t_{\text{ц}} - t_R) = B(t_{\text{ц}} - t_R). \quad (7)$$

Отличительными особенностями тепломера Гардона является возможность измерения нестационарных тепловых потоков, широкий диапазон рабочих температур, простота конструкции, надежность в работе.

Погрешности измерения тепловых потоков

На практике наиболее часто приходится измерять тепловой поток, испускаемый или поглощаемый поверхностью, а также поток, протекающий между твердыми телами. Первые вид теплового потока встречается при исследовании теплоотдачи тел, а второй – при измерении теплофизических характеристик.

При измерении теплового потока на поверхности тела теплоотдающая поверхность тепломера должна иметь температуру, по возможности близкую к температуре исследуемой поверхности ($t_T = t_{II}$) до наложения тепломера, и равные коэффициенты теплообмена ($\alpha_T = \alpha_{II}$). Кроме того, необходимо обеспечить равенство тепловоспринимающей и теплоотдающей поверхностей датчика.

Первое требование можно выполнить, уменьшая внутреннее сопротивление тепломера R_T и контактное сопротивление между датчиком и поверхностью R_K .

Коэффициент теплообмена α складывается из лучистой и конвективной α_K составляющих. Равенство лучистых составляющих обеспечивается подбором соответствующей степени черноты тепломера; равенство конвективной составляющей – за счет ориентации датчика в

пространстве подобно ориентации исследуемого участка теплоотдающей поверхности и сохранения характера газового потока около тепломера; равенство теплоотдающих и тепловоспринимающих поверхностей в тепломерах – конструктивными мерами. При измерении потоков между твердыми телами важно, чтобы не рассеивался тепловой поток, входящий в тепломер, т.е. входящий и выходящий потоки должны быть равны. Меньшие потоки рассеивания будут у тепломеров с малым тепловым сопротивлением, малым контактным сопротивлением и малой толщиной.

Посмотрим, как эти требования выполняются у различных типов тепломеров. У тепломера ОРГРЭС корпус сделан из материала с высокой теплопроводностью. Входящий в основание корпуса тепловой поток направляется в обход измерительного элемента тепломера, имеющего значительное тепловое сопротивление. В момент измерения при равенстве температур пластинки и корпуса тепловой поток из корпуса целиком выходит через боковую поверхность. Контактное сопротивление тепломера уменьшается обычными средствами: правильной формой контактной поверхности, высокой чистотой обработки, смазкой, плотным прижимом. Обтекаемая форма, малая толщина тепломера исключают изменение характера конвективного теплообмена ($\alpha_{Т,К} = \alpha_{П,К}$), а соответствующий выбор покрытия пластинки обеспечивает равенство лучистых коэффициентов теплообмена. Отклонение температуры пластинки в тепломере ОРГРЭС от температуры исследуемой поверхности происходит лишь за счет контактного сопротивления и погрешностей термометров сопротивления.

В тепломере ИТТФ для снижения теплового сопротивления рабочий слой тепломеров создается за счет металлических деталей – спаев термостолбика. В результате этого эффективный коэффициент теплопроводности тепломеров имеет величину $\lambda_{эф} \geq 2...5$ Вт/(м·К), т.е. на один-два порядка выше, чем у тепломеров с неметаллическим рабочим слоем, например, резиновым. Чтобы сохранить неизменным конвективный коэффициент теплообмена, оба тепломера должны иметь обтекаемую форму и малую толщину. Контактное сопротивление уменьшается известными приемами.

В альфа-калориметре в момент измерения (при равенстве температур пластинки и корпуса) тепловой поток, входящий в тепломер, отводится по металлическому корпусу в обход пластинки, т.е. тепломер имеет внутреннее сопротивление, близкое к нулю. Контактное сопротивление уменьшается обычными приемами, а коэффициент теплообмена приводится в соответствие с коэффициентом теплообмена для исследуемой поверхности.

Чтобы определить основные характеристики тепломеров, используются различные методы и устройства (Рисунок 6).

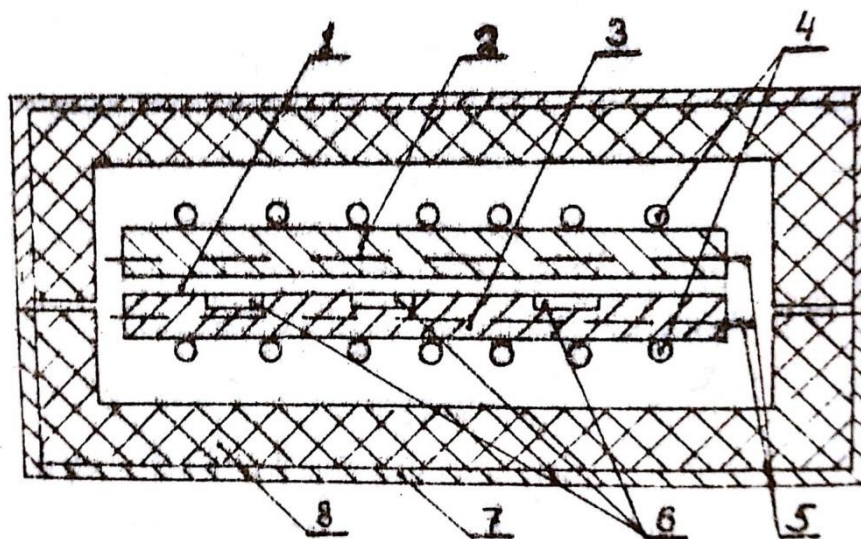


Рисунок 6

Для определения нормированных характеристик тепломеров необходимо подать на него известный тепловой поток и сопоставить результат измерения потока с заданной величиной. В лабораторной работе исследование тепломеров проводится на стенде, принципиальная схема которого изображена на рисунке 6. Тепловой поток задается в узкой газовой прослойке 1, образованной двумя пластинами 2 и 3. Между пластинами поддерживается разность температур, для чего на пластинах смонтированы нагреватели 5 и холодильники 4. Нагревателем является нихромовая проволока в кварцевой изоляции, уложенная в пазы пластин таким образом, чтобы обеспечивалось равномерное по поверхности поле температур. Питание нагревателей осуществляется от ЛАТРа, установленного в корпусе стенда. Исследуемые преобразователи 6 устанавливаются заподлицо с поверхностью нижней пластины в предусмотренные для них гнезда. Чтобы исключить влияние на теплообмен в прослойке внешней среды и уменьшить тепловые потери, пластины помещены в корпус 7 с теплоизоляцией 8. Для удобства работы верхняя часть корпуса вместе с пластиной поднимается и поворачивается в сторону, вокруг стойки. Размеры прослойки выбраны таким образом, чтобы в ней отсутствовали трудноучитываемые конвективные токи тепла. Верхнее предельное значение толщины прослойки ограничивается неравенством $Gr \cdot Pr < 680$, где Gr и Pr – критерии Грасгофа и Прандтля.

Чтобы определить величину задаваемого теплового потока, необходимо знать среднеповерхностные температуры пластин $t_{1,s}$ и $t_{2,s}$. Для их измерения служат трехспайные термобатарей, спаи которых равномерно распределены по поверхности пластин. Плотность теплового потока определяется по формуле:

$$q = K(t_{1,S} - t_{2,S}), \quad (8)$$

где $K = \alpha_\lambda + \alpha_\lambda$ – коэффициент теплообмена между пластинами; α_λ – кондуктивная составляющая; α_λ – лучистая составляющая, которая вычисляется по формуле:

$$\alpha_\lambda = 5,67 \cdot \varepsilon_{пр} \cdot \frac{\left[\left(\frac{t_{1,S}+273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{2,S}+273}{100} \right)^4 \right]}{t_{1,S} - t_{2,S}}, \quad (9)$$

где $\varepsilon_{пр}$ – приведённая степень черноты поверхностей пластин, обращенных друг к другу. Ошибка в определении степени черноты поверхностей ПТП несущественно влияет на результат, так как $\varepsilon_{пр}$ определяется в основном степенью черноты поверхности верхней пластины ($\varepsilon_1 = 0,05$, $\varepsilon_2 = 0,9$). Кроме того, вклад лучистой составляющей в суммарный теплообмен в рабочей области температур (20...100° С) не превышает 10%.

Напомним, что тепломеры ОРГРЭС и альфа-калориметр в силу своего метода измерения предназначены для определения потоков выходящих из тела, тепломер Гардона – для определения потоков входящих в тело, тепломеры ИТТФ и комбинированный – для определения потоков обоих направлений. Чтобы проводить исследования со всеми тепломерами, на стенде предусмотрена возможность изменения направления теплового потока. Это осуществляется переключением нагревателей и холодильников пластин.

При описании погрешности измерения тепломерами теплового потока уже упоминалось о необходимости добиваться равенства температур поверхностей тепломера и объекта. Реально это удастся осуществить не всегда. Для количественной оценки искажения температурного поля объекта на поверхности тепломеров расположены термопары.

Измерительная схема стенда показана на рисунке 7. Питание стенда осуществляется от сети переменного тока 220 В, 50 Гц. Измерение всех величин проводится цифровым микровольтметром, который подключается к стенду через гнезда на задней панели. Переключателем Π_1 к измерительному прибору подключаются цепи тепломеров и термобатарей, измеряющих температуры пластин (галеты "а" и "б"), а также термопары, измеряющие перепад температур между поверхностями тепломеров нижней пластины ("в").

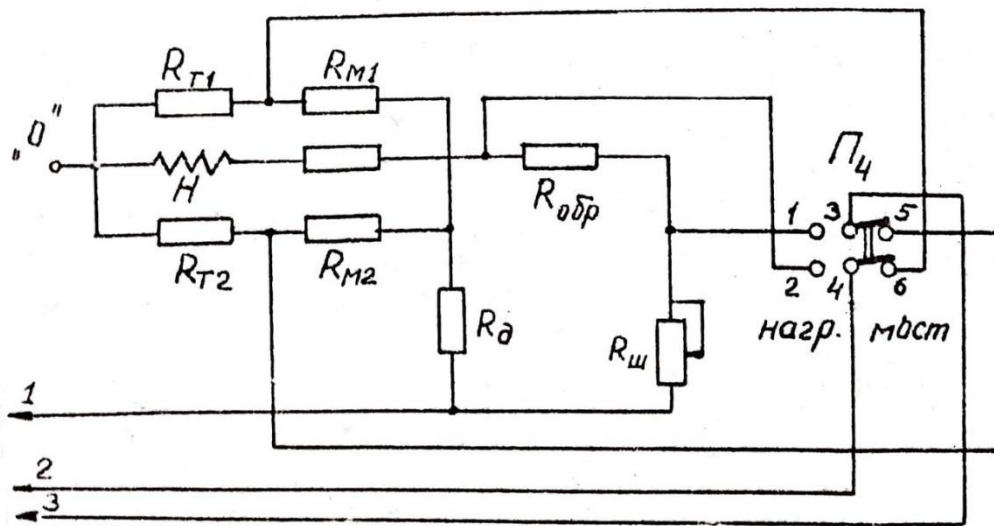
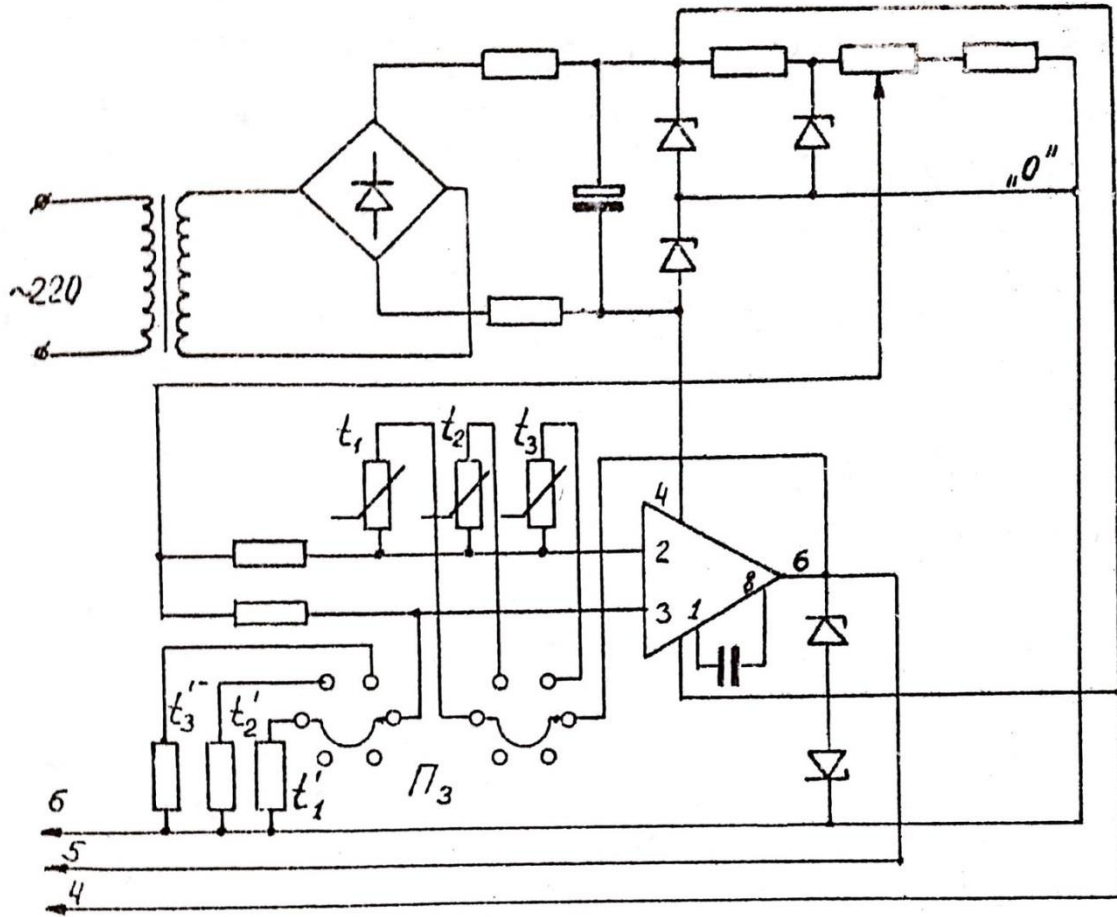


Рисунок 7

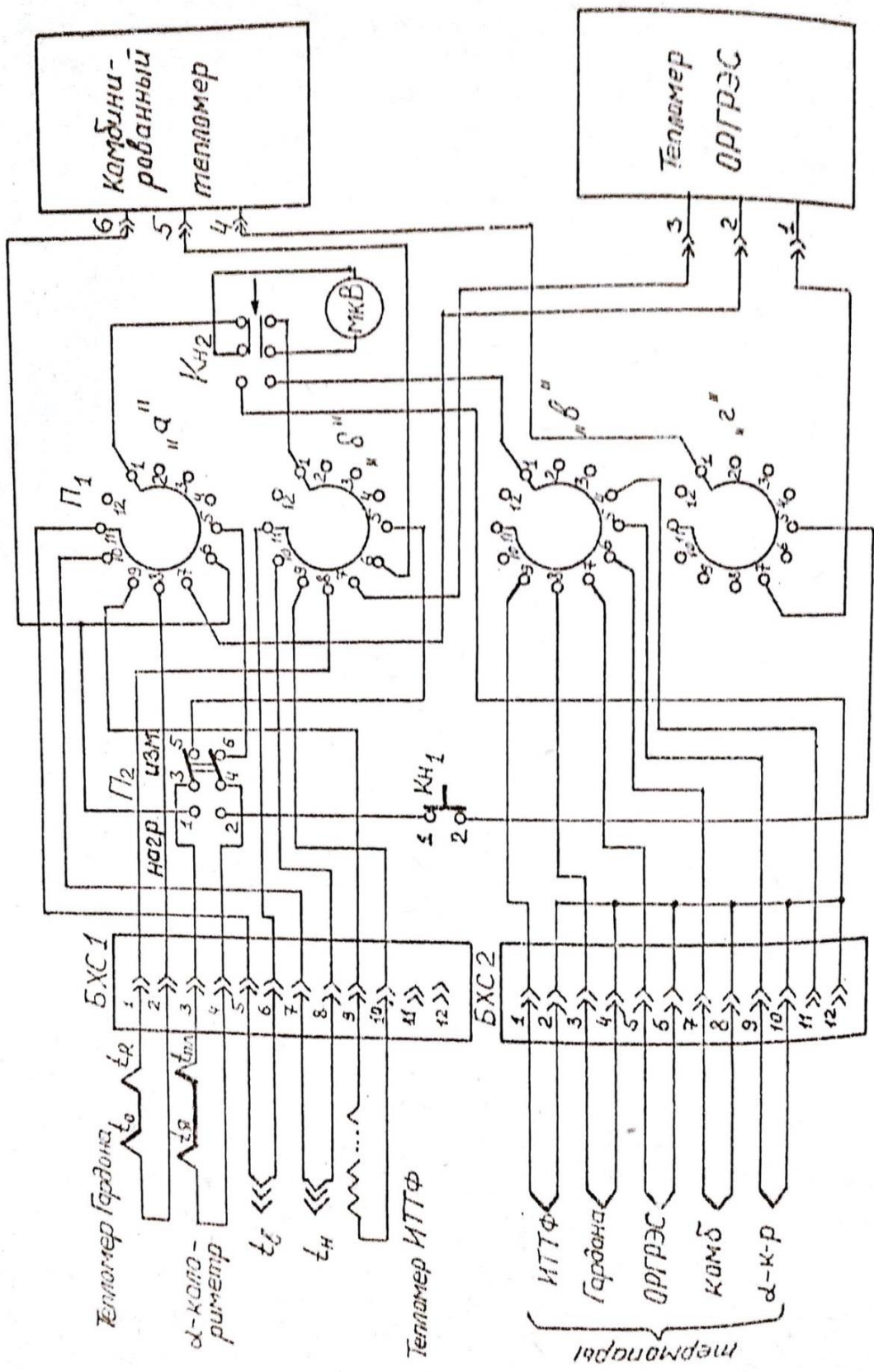


Рисунок 8

Измерительная цепь комбинированного тепломера представляет собой линейризованный мост, в одно из плеч которого включаются термометры сопротивления t_1, t_2, t_3 , измеряющие соответствующие температуры тепломера. Резисторы t'_1, t'_2, t'_3 служат для балансировки моста при начальной температуре.

Термометрическая часть тепломера ОРГРЭС собрана по схеме уравновешенного измерительного моста постоянного тока. Активными плечами моста являются термометры сопротивления R_{T1} и R_{T2} . Другими плечами являются постоянные резисторы R_{M1} и R_{M2} выполненные из манганиновой проволоки (рисунок 7, 8). В положении переключателя Π_1 в тепломере ОРГРЭС на мост подается напряжение. При этом переключатель Π_4 находится в положении "Мост". Регулируя реостатом R_p ток через нагреватель, добиваются компенсации моста, после чего переключатель Π_4 переводят в положение "Нагр.". Измерив падение напряжения на образцовом сопротивлении $R_{обр}$, определяют ток I_H через нагреватель:

$$I_H = \frac{U_{обр}}{R_{обр}}, \quad (10)$$

а затем – подводимую к нему электрическую мощность

$$W = R_H \cdot I_H^2. \quad (11)$$

Плотность теплового потока с поверхности чувствительного элемента

$$q = \frac{W}{S} = \frac{R_H \cdot I_H^2}{S}, \quad (12)$$

где S - площадь чувствительного элемента.

Измерительная цепь альфа-калориметра состоит из переключателя Π_2 , кнопки $КН_1$ и источника питания постоянного напряжения 12 В. В положении "Нагрев" переключателя Π_2 терморезистор-нагреватель альфа-калориметра подключается через кнопку $КН_1$ к источнику питания. При нажатии кнопки цепь замыкается, и происходит нагрев ядра альфа-калориметра. После разогрева ядра выше температуры пластины переключатель переводится в положение "Измерение". Терморезистор-нагреватель подключается к измерительному прибору для регистрации темпа охлаждения альфа-калориметра.

Тепломер ИТТФ и тепломер Гардона представляют собой термоэлектрические преобразователи и являются источниками ЭДС. В соответствующем положении переключателя Π_1 эти тепломеры подключаются к измерительному прибору.

Проведение измерений

Измерения проводятся при двух направлениях теплового потока.

- I. Поток направлен от нижней плиты к верхней.
 - 1) Кран установить в положение "Верхняя пластина".
 - 2) На ЛАТРе установить напряжение $U_n = 75$ В, что соответствует потоку $\approx 5 \cdot 10^2$ Вт/м².
 - 3) Включить тумблер "Нагреватель нижний".
 - 4) Переключатель Π_1 установить в положение t_n , дождаться выхода стэнда на стационарный режим (за 1 мин показания изменяются не более, чем на 5%). Записать показания прибора в таблицу.
 - 5) Переключатель перевести в положение t_e , снять показания прибора, записать в таблицу. Далее, переводя переключатель в положение "ИТТФ", "ОРГРЭС", "Комбинированный", "альфа-калориметр", проводить измерения заданного теплового потока последовательно перечисленными тепломерами.

Тепломер ОРГРЭС. При переводе переключателя Π_4 в положение "Мост" измерительный прибор включается в диагональ моста, образованного термометрами сопротивления R_{T1} , R_{T2} и резисторами R_{M1} , R_{M2} . Установив реостатом R_P некоторое значение тока, через нагреватель наблюдают за изменением сигнала разбаланса моста. Необходимо найти такое положение R_P , при котором мост будет находиться в равновесии. Затем переключатель Π_4 переводят в положение "Нагр" и измеряют падение напряжения на образцовом сопротивлении $R_{обр}$. Определяют ток через нагреватель по формуле (10) и плотность измеренного теплового потока по формуле (12).

Комбинированный тепломер. Переключатель Π_3 устанавливают в положения " t_1 ", " t_2 ", " t_3 ", снимают показания прибора и по графикам определяют температуры соответствующих поверхностей тепломера. Плотность измеренного теплового потока определяют по формуле (3), где $t_{1,s} = t_2$, $t_{2,s} = t_3$, $\alpha = \lambda(t)/\delta$, $\lambda = 0,024 + 0,077 \cdot (t_{1,s} + t_{2,s})$, $\delta = 10^{-3}$ м.

Альфа-калориметр. Переключатель Π_2 устанавливают в положение "Нагр". Термопара-нагреватель подключается к источнику питания кнопкой $КН_1$. На короткое время, примерно равное 10с, нажимают кнопку $КН_1$, затем переключатель Π_2 приводят в положение "Измерение" и наблюдают за охлаждением ядра альфа-калориметра. С помощью секундомера засекают время, за которое сигнал с термопары изменится от -100 мкВ до 100 мкВ, пройдя через ноль. Скорость охлаждения определяют по формуле:

$$B_v = \frac{2 \cdot \Delta E \cdot K_t}{\Delta \tau}, \quad (13)$$

где $\Delta E = 100$ мкВ – заданное значение; τ – время отсчета; K_t – чувствительность термопары (для нихромконстантановой $K_t = 26,7$ К/мВ).

Тепловой поток определяют по формуле (5).

Тепломеры ИТТФ и Гардона. В соответствующем положении переключателя Π_1 измеряют ТЭДС, развиваемые тепломерами. Тепловой поток определяют по формуле:

$$q = K_T \cdot E, \quad (14)$$

где K_T – постоянная тепломера, Вт/(м²·мВ); E – сигнал с тепломера, мВ.

II. Тепловой поток направлен от верхней плиты к нижней.

- 1) Кран на верхней панели стенда установить в положение "Нижняя пластина".
- 2) На ЛАТРе установить напряжение $U_H = 33$ В, что соответствует потоку $\approx 1 \cdot 10^3$ Вт/м².
- 3) Включить тумблер "Нагреватель верхний".
- 4) Переключатель Π_1 установить в положение t_B , дождаться установления стационарного режима, записать показания прибора в таблицу.
- 5) В положении t_H переключателя Π_1 снять показания прибора, занести в таблицу. При таком направлении теплового потока провести измерения тепломерами ИТТФ, комбинированным, Гардона.

При измерениях теплового потока тепломерами провести измерения температуры поверхности тепломеров (кроме альфа-калориметра) и результат (разность температур Δt пластины и тепломера) занести в таблицу.

Контрольные вопросы

1. По каким параметрам должны согласовываться тепломеры с объектом измерения?
2. Как изменится тепловой поток от поверхности при наложении тепломера с большими внутренними и контактными сопротивлениями?
3. Как влияет ухудшение контакта между тепломером и исследуемой поверхностью на результат измерения потока?
4. Какие средства уменьшают контактное сопротивление тепломера?
5. Как объяснить равенство конвективных коэффициентов теплообмена с тепломера и с исследуемой поверхностью?

6. Как устроен тепломер ОРГРЭС? Почему его датчик слабо искажает тепловой поток с поверхности плиты?
7. Как измеряется мощность нагревателя в тепломере ОРГРЭС? Соответствует ли эта мощность искомому потоку?
8. Как влияет отсутствие равенства температур пластинки и основания тепломера ОРГРЭС на результат измерения?
9. Как устроен комбинированный тепломер?
10. В чем отличие двух режимов работ комбинированного тепломера?
11. Какие потоки можно измерять с помощью комбинированного тепломера?
12. Как устроен тепломер ИТТФ? В каком температурном диапазоне он работает?
13. Как устроен альфа-калориметр? В каком диапазоне температур он работает?
14. Как проводится измерение скорости охлаждения пластинки альфа-калориметра?
15. Как долго можно проводить нагрев пластинки альфа-калориметра, чтобы не вывести его из строя?
16. Как устроен тепломер Гардона?
17. Почему в тепломере Гардона необходимо охлаждать или термостатировать втулку?
18. Какие требования предъявляются к степени черноты датчика?
19. Какие из рассмотренных тепломеров не требуют индивидуальной градуировки?
20. Какими из рассмотренных тепломеров можно измерять нестационарные тепловые потоки?

Тип ПТП	Постоянные прибора	Температуры плит $t_{1S}, t_{2S},$ °C	Результаты измерений	$Q_{\text{эсп}},$ $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$	$Q_{\text{расч}},$ $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$	$\delta q,$ %	$\Delta t,$ К
ОРГРЭС	$R_H = 57,6 [\text{Ом}]$ $S_T = 1,37 \cdot 10^{-2} [\text{м}^2]$ $K = \frac{1}{R_H \cdot S_T}$ $= 0,011 \left[\frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}^3} \right]$	$t_{1S} =$ $t_{2S} =$	$I_1 = \dots \text{А}$				
		$t_{1S} =$ $t_{2S} =$	$I_2 = \dots \text{А}$				
		$t_{1S} =$ $t_{2S} =$	$I_3 = \dots \text{А}$				
Комбинированный	$K = 0,092 \left[\frac{\text{К}}{\text{мВ}} \right]$	$t_{1S} =$ $t_{2S} =$	$E_1 = \dots \text{мВ}$				
		$t_{1S} =$ $t_{2S} =$	$E_2 = \dots \text{мВ}$				
		$t_{1S} =$ $t_{2S} =$	$E_3 = \dots \text{мВ}$				

ИТТФ	$K=58,02 \left[\frac{\text{BT}}{\text{M}^2 \cdot \text{MB}} \right]$	$t_{1S} =$ $t_{2S} =$	$E_1 = \dots \text{MB}$				
		$t_{1S} =$ $t_{2S} =$	$E_2 = \dots \text{MB}$				
		$t_{1S} =$ $t_{2S} =$	$E_3 = \dots \text{MB}$				
Гардон а	$K = \left[\frac{\text{BT}}{\text{M}^2 \cdot \text{MB}} \right]$	$t_{1S} =$ $t_{2S} =$	$E_1 = \dots \text{MB}$				
		$t_{1S} =$ $t_{2S} =$	$E_2 = \dots \text{MB}$				
		$t_{1S} =$ $t_{2S} =$	$E_3 = \dots \text{MB}$				
Альфа- калори метр	$K=4360 \left[\frac{\text{Дж}}{\text{M}^2 \cdot \text{K}} \right]$ $K_t=26,7 \left[\frac{\text{K}}{\text{MB}} \right]$	$t_{1S} =$ $t_{2S} =$	$\Delta E = \dots \text{MB}$ $\tau_1 = \dots \text{c}$ $\tau_2 = \dots \text{c}$ $\tau_3 = \dots \text{c}$ $\tau_4 = \dots \text{c}$ $b_v = \dots \frac{\text{MB}}{\text{c}}$				
		$t_{1S} =$ $t_{2S} =$	$\Delta E = \dots \text{MB}$ $\tau_1 = \dots \text{c}$ $\tau_2 = \dots \text{c}$ $\tau_3 = \dots \text{c}$ $\tau_4 = \dots \text{c}$ $b_v = \dots \frac{\text{MB}}{\text{c}}$				
		$t_{1S} =$ $t_{2S} =$	$\Delta E = \dots \text{MB}$ $\tau_1 = \dots \text{c}$ $\tau_2 = \dots \text{c}$ $\tau_3 = \dots \text{c}$ $\tau_4 = \dots \text{c}$ $b_v = \dots \frac{\text{MB}}{\text{c}}$				

Измерение нестационарных тепловых потоков

Цель работы – ознакомление с методами и устройствами для задания и измерения переменных по времени тепловых потоков, определение параметра тепловой инерции тепломеров на стадии проектирования.

В настоящее время существует большое разнообразие методов и устройств для измерения стационарных тепловых потоков. Значительно хуже состояние дел по измерению переменных потоков, хотя именно такие измерения являются актуальными для научных исследований и большинства технологических процессов.

В последние годы актуальным и успешно развивающимся направлением является восстановление нестационарных тепловых потоков путем решения обратных задач теплопроводности.

Вместе с измерением нестационарных потоков важной является задача создания переменного потока с помощью различных устройств, предназначенных как для градуировки тепломеров, так и для определения погрешности измерений преобразователями различных типов. На величину погрешности большое влияние оказывает параметр, характеризующий тепловую инерцию.

В лабораторной работе проводятся измерения нестационарного потока с помощью градиентных тепломеров; задание потока, меняющегося во времени по произвольному закону; определение параметра тепловой инерции.

Конструкция градиентных тепломеров или, как их иногда называют, тепломеров "вспомогательная стенка", подробно описана в лабораторной работе № 1. Эти тепломеры нашли широкое распространение для измерения стационарных потоков. При этом, как известно, искомый поток определяют из зависимости [5]:

$$q = K \cdot \Delta t, \quad (1)$$

где K – коэффициент, полученный из градуировочных опытов и являющийся характерным для данного тепломера; Δt – перепад температур по толщине тепломера.

Измерения переменных потоков с помощью градиентных тепломеров оправданы лишь в том случае, если температурное поле по толщине тепломера близко к линейному, т.е. в случае медленно меняющихся потоков. Вместе с тем, такие тепломеры можно использовать и для измерения сравнительно быстро меняющихся тепловых потоков, если рассмотреть иную тепловую модель, а именно – представить градиентный тепломер на массивном основании с известными теплофизическими свойствами (рисунок 1).

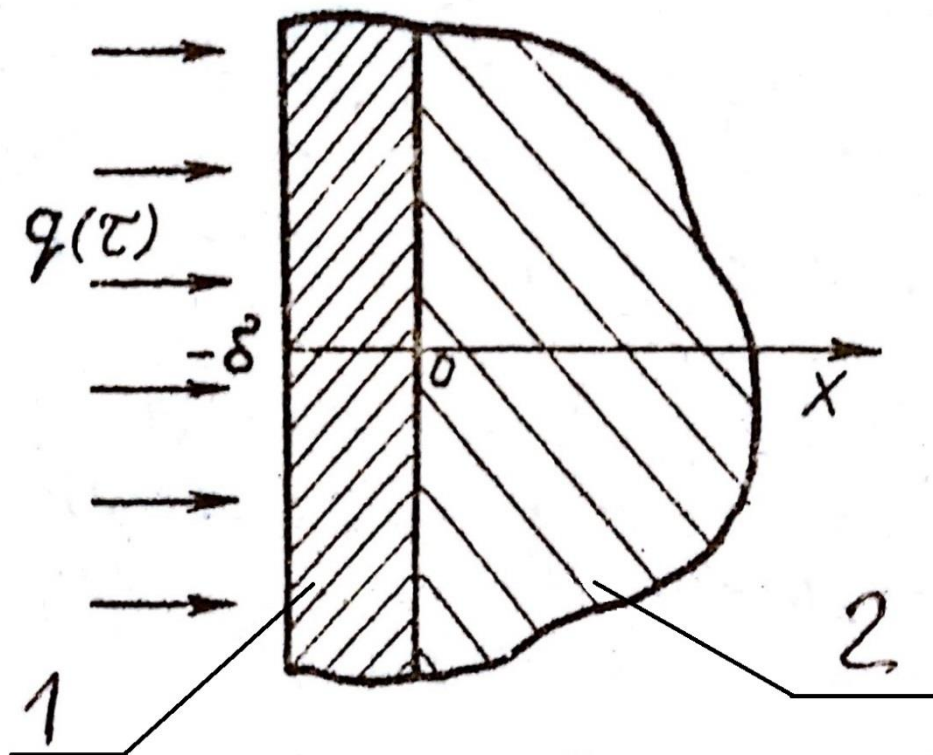


Рисунок 1

Математическая постановка задачи имеет вид:

$$\frac{\partial t_i}{\partial \tau} = a_i \cdot \frac{\partial^2 t_i}{\partial x^2}, \quad (2)$$

где $i = 1, 2 \dots n$, при граничных условиях

$$q(\tau) = \lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} \Big|_{x=-\delta}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial t_2}{\partial x} \Big|_{x \rightarrow \infty} = 0, \quad (4)$$

при условиях сопряжения

$$\lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial x} \Big|_{x=0}, \quad (5)$$

или

$$t_1(0, \tau) = t_2(0, \tau), \quad (6)$$

при начальных условиях

$$t_i|_{\tau=0} = t_c, \quad (7)$$

где $i = 1, 2 \dots n$. Индекс “Г” относится к пластине толщиной δ , расположенной на массивном основании 2 (рисунок 1).

Решение системы (2)...(7) ведется с помощью преобразования Лапласа. Изображение теплового потока имеет вид:

$$Q(S) = \frac{1}{Y_q(S)} \cdot \Delta Q(S), \quad (8)$$

$$\frac{1}{Y_q(S)} = \frac{\lambda_1}{\sqrt{a_1}} \cdot \frac{\sqrt{S} \cdot \left(sh \sqrt{\frac{S}{a_1}} \cdot \delta + \varkappa \cdot ch \sqrt{\frac{S}{a_1}} \cdot \delta \right)}{\left(ch \sqrt{\frac{S}{a_1}} \cdot \delta + \varkappa \cdot sh \sqrt{\frac{S}{a_1}} \cdot \delta - 1 \right)}, \quad (9)$$

где $Y_q(S)$ - передаточная функция перепада температур по отношению к тепловому потоку; S - параметр преобразования Лапласа.

Взаимосвязь между искомым потоком $q(\tau)$ и сигналом тепломера $\Delta t(\tau)$ выражается равенством:

$$q(\tau) = \frac{\lambda_1}{\sqrt{\pi a_1} \cdot \tau} \cdot \left\{ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[1 + \frac{(1-\varkappa)^n}{(1+\varkappa)^n} \right] \cdot e^{-\frac{n^2 \cdot A^2}{4\tau}} \right\} \cdot \Delta t(\tau) + \frac{\lambda_1}{\sqrt{\pi a_1}} \cdot \int_0^{\tau} \frac{[\Delta t(\tau) - \Delta t(\xi)]}{(t-\xi)^{3/2}} \cdot \left\{ 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \left[1 + \frac{(1-\varkappa)^n}{(1+\varkappa)^n} \right] \frac{n^2 A^2 - 2(\tau-\xi)}{2(\tau-\xi)} \cdot e^{-\frac{n^2 \cdot A^2}{4(\tau-\xi)}} \right\} d\xi, \quad (10)$$

где λ_1, a_1 – тепло- и температуропроводность материала датчика; λ_2, a_2 – то же для основания, на котором датчик размещен; $\varkappa = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cdot \sqrt{\frac{a_1}{a_2}}$ – отношение тепловых активностей материалов датчика и основания; $A = \frac{\delta}{\sqrt{a_1}}$, δ – толщина тепломера; ξ – переменная интегрирования.

Определение параметра, характеризующего тепловую инерцию тепломера

В общем случае переменный поток следует рассчитывать по зависимости (10). Однако существуют случаи, когда использование зависимости (10) затруднительно. Например, в системах автоматического регулирования тепловых процессов предпочтительнее пользоваться соотношением типа (1), в котором сигнал датчика связан с определяемым потоком прямой пропорциональной зависимостью. Поскольку применение

выражения (1) в качестве расчетного соотношения правомерно лишь в случае линейного распределения температур по толщине тепломера, то могут возникнуть большие погрешности при динамических измерениях, особенно в начальные моменты времени, вызванные перестройкой температурного поля внутри датчика, которая обусловлена его тепловой инерцией.

Тепловую инерцию принято характеризовать параметром η , равным промежутку времени, за который значение постоянного во времени потока, измеренного с помощью тепломера, будет составлять 0,67 от потока, поглощенного тепломером в тот же момент времени. Параметр тепловой инерции η обычно определяют экспериментально при внезапной экспозиции тепломера постоянным тепловым потоком.

В работе [3] получено аналитическое выражение для определения параметра η на основании анализа первого слагаемого в правой части (10):

$$q'(\tau) = \frac{\lambda_1}{\sqrt{\pi a_1} \cdot \tau} \cdot \left\{ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[1 + \frac{(1-\varepsilon)^n}{(1+\varepsilon)^n} \right] \cdot e^{-\frac{n^2 \cdot A^2}{4\tau}} \right\} \cdot \Delta t(\tau) = K_0(\tau) \cdot \Delta t(\tau). \quad (11)$$

Показано, что коэффициент $K_0(\tau)$ в выражении (11) спустя некоторое время $\tau = \tau^*$ принимает постоянное значение $K_0 = const$, причем время установления $K_0 = const$ не зависит от закона изменения падающего потока, и численно равно параметру η , определяемому экспериментально. Таким образом, для того, чтобы аналитически определить постоянную тепловой инерции тепломера, достаточно из выражения (11) найти время, спустя которое коэффициент $K_0(\tau)$ примет постоянное значение.

Описание экспериментальной установки

Задание потоков, меняющихся во времени по известному закону, является сложной задачей. Ниже дано описание устройства, разработанного на кафедре Компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга Университета ИТМО, схема которого принята для метрологической аттестации тепломеров [4].

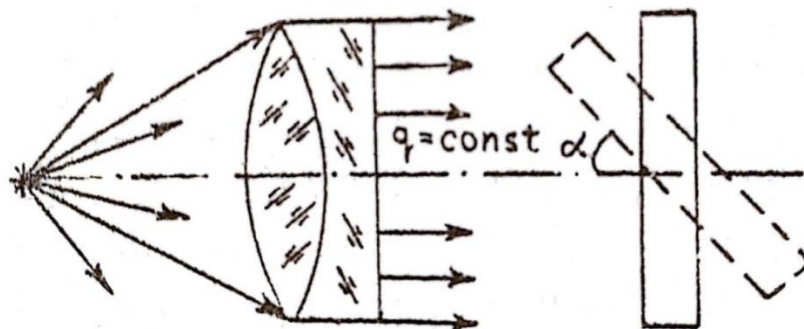


Рисунок 2

Известно, что если на прямолинейную площадку падает плоскопараллельный тепловой поток q (рисунок 2), то справедливо соотношение:

$$q = q_0 \cdot \sin \alpha, \quad (12)$$

где α – угол между направлением излучения и площадкой; q_0 – максимальное значение потока при $\alpha = 90^\circ$.

Если значение угла α менять во времени по произвольному закону, то и величина теплового потока q , падающего на исследуемую площадь, будет меняться по тому же закону:

$$q = q_0 \cdot \sin \alpha (\tau). \quad (13)$$

В данном случае роль площадки выполняет исследуемый тепломер. В качестве источника плоскопараллельного теплового потока может быть использован любой из излучателей, описанных, например, в работе [5].

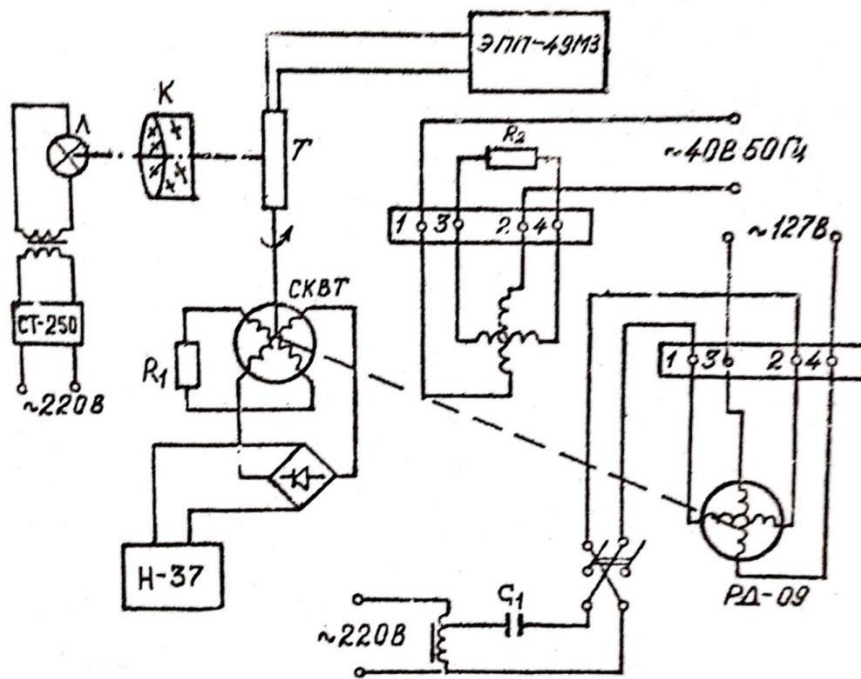


Рисунок 3

Принципиальная схема устройства представлена на рисунке 3. Тепломер T , жестко укрепленный на оси синусо-косинусного поворотного устройства трансформатора СКПТ, приводится во вращение реверсивным двигателем РД. Питание обмоток двигателя осуществляется отдельно, что позволяет регулировать скорость вращения тепломера в широких пределах. Известно, что при повороте ротора трансформатора на угол α_T в его синусной обмотке наводится электродвижущая сила, которая создает на клеммах обмотки напряжение:

$$U(\tau) = U_m \cdot \sin \alpha_T(\tau), \quad (14)$$

где U_m – максимальное значение напряжения на синусной обмотке при $\alpha_T=90^\circ$.

При условии $\alpha(\tau) \equiv \alpha_T(\tau)$ из выражений (13) и (14) аналитическая связь между падающим потоком $q(\tau)$ и измеряемым напряжением $U(\tau)$ имеет вид:

$$q(\tau) = \frac{q_0}{U_m} \cdot U(\tau), \quad (15)$$

где величины q_0 и U_m определяют из градуировочных опытов. Запись показаний тепломера и СКПТ ведется с помощью автоматической системы сбора и обработки информации.

Погрешность задания нестационарного теплового потока.

На суммарную погрешность задания нестационарного теплового потока будут влиять: погрешность задания постоянного потока с помощью излучателя, фиксации угла поворота трансформатора, а также погрешность, связанная с изменением поглощательной способности поверхности тепломера при изменении угла α и погрешность вторичной измерительной аппаратуры.

Для излучателей потоков низкой интенсивности задача определения и уменьшения погрешностей достаточно полно изучена.

Следуя указанным рекомендациям, можно получить плоскопараллельный лучистый тепловой поток с неравномерностью его интенсивности (по сечению диаметром до 50 мм) не хуже 1 %.

Погрешность фиксации угла поворота СКПТ типа ВТ-5 по паспортным данным не превышает 0,2 %. Погрешность измерительной аппаратуры определяется, в основном, погрешностью цифрового вольтметра, которая рассчитывается по формуле:

$$\delta = \pm \left(0,05 + 0,05 \cdot \frac{U_K}{U_x} \right), \quad (16)$$

где U_K – конечное значение установленного предела измерений; U_x – показания прибора.

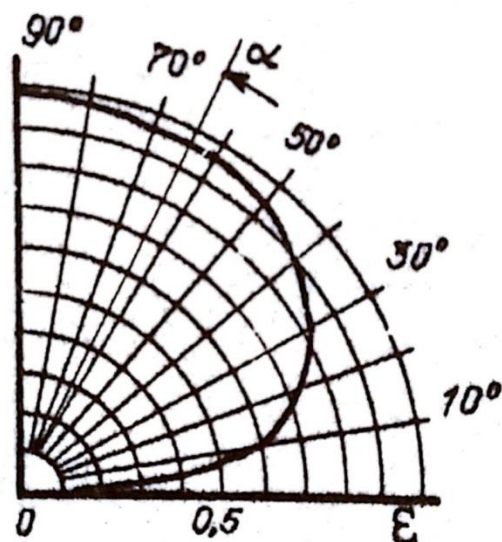


Рисунок 4

Для определения поправки, связанной с изменением поглощательной способности ε поверхности тепломера при изменении угла α , необходимо пользоваться графиком, приведенным на рисунке 4. Для задания углов поворота тепломера вычисляется относительная погрешность в определении степени черноты, затем вычисляется абсолютная погрешность измерения потока. Найденная поправка суммируется с показаниями тепломера, полученными во время опыта.

Порядок подготовки и проведения опыта

1. Включить источник лучистого теплового потока (при закрытой заслонке) и систему автоматического сбора и обработки информации.
2. Установить исследуемый тепломер в справку, предварительно смазав контактные поверхности смазкой КПП-8.
3. Установить оправку в стенде так, чтобы угол между направлением излучения и плоскостью тепломера был равен 90° .
4. Открыть заслонку и записать сигнал датчика на цифропечать и в память ЭВМ (для экспериментального и аналитического определения постоянной тепловой инерции датчика).
5. Закрыть заслонку излучателя, установить справку так, чтобы угол α был равен нулю. Дождаться наступления стационарного режима (10 – 15 мин).
6. Установить заданное напряжение на ЛАТРе с тем, чтобы обеспечить заданную скорость вращения реверсивного двигателя.
7. Открыть заслонку излучателя, включить тумблер "Сеть" стенда и систему сбора информации.
8. При достижении значения $\alpha = 90^\circ$ выключить тумблер "Сеть" и закрыть заслонку излучателя.
9. Обработать результаты.

10. Представить графики зависимости заданного $q'(\tau)$ и рассчитанного по формуле (10) $q(\tau)$ тепловых потоков.
11. Определить параметр η , характеризующий тепловую инерцию тепломера.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные методы измерения стационарных тепловых потоков.
2. При каких условиях можно использовать расчетное соотношение (1) для измерения тепловых потоков?
3. В чем особенности измерения нестационарных тепловых потоков?
4. Как определяется параметр, характеризующий тепловую инерцию тепломера?
5. Как влияют условия расположения датчика на величину его постоянной тепловой инерции?
6. Для чего необходима смазка тыльной поверхности тепломера при установке его в оправку?
7. Перечислите основные систематические погрешности задания нестационарного теплового потока на стенде.
8. При каких условиях можно пренебречь погрешностью, связанной с искажением температурного поля объекта при размещении на нем тепломера?
9. Как учитывается погрешность, связанная с изменением угла поворота датчика относительно направления лучистого потока?

Исследование нестационарного теплообмена в псевдооживенных слоях

Цель работы – ознакомление с техникой псевдооживения и методом измерения быстроменяющегося (пульсирующего) теплового потока.

Краткие сведения о псевдооживенном слое

Одной из важных научно-технических задач является интенсификация теплообмена в различных технологических процессах. Одним из путей решения этой задачи является создание псевдооживенного слоя, который в простейшем случае можно представить следующим образом. Если в камеру с дном в виде сетки насыпать слой мелкозернистого сыпучего материала и продуть его восходящим потоком воздуха, то при определенной скорости продувки перепад давления на слое станет численно равным весу зернистого материала, приходящегося на единицу площади; частицы приобретут подвижность, сцепление между ними нарушится. В результате этого слой приобретает некоторые свойства жидкости, а именно: свободный уровень его будет располагаться горизонтально; струя материала, как жидкость, будет вытекать из отверстия в стенке; в слое будут тонуть предметы, плотность которых больше плотности слоя и, наоборот, всплывут более легкие предметы, причем сопротивление их движению станет по порядку величины таким же, как и в обычных жидкостях. Отсюда и название слоя – псевдооживенный. Иногда его называют также псевдокипящим.

Скорость газа, соответствующая началу псевдооживения, называется первой критической. При дальнейшем увеличении скорости оживающего агента (газа) гидравлическое сопротивление слоя остается постоянным. Избыточное, сверхкритическое количество газа прорывается через слой в виде пузырей. Зернистый материал интенсивно перемешивается в слое проходящими пузырями. Отдельные частицы подбрасываются над слоем тем выше, чем больше скорость газа.

При скорости, близкой к скорости витания частиц, т.е. к скорости установившегося падения частиц в свободном пространстве, когда сила тяжести равна силе гидродинамического сопротивления, (вторая критическая скорость), высота выбросов становится слишком большой, что приводит к интенсивному выносу материала из камеры. В псевдооживенном слое различают внутренний теплообмен – между частицами и газом и внешний – между слоем и поверхностью стенок камеры или трубами, помещенными в слой.

Благодаря наличию подвижного дисперсного материала коэффициент внешнего теплообмена в десятки раз превосходит коэффициент теплообмена между поверхностью и газом при той же скорости продувки.

Важной особенностью процесса является чрезвычайно развитая поверхность частиц в слое. Это обеспечивает хороший тепловой контакт дисперсного материала с оживающим агентом. Подав в аппарат поток нагретого газа, можно быстро нагреть слой (а также расположенные в нем предметы) до требуемой температуры. При этом сам слой будет характеризоваться высокой равномерностью температуры вследствие постоянного движения частиц, находящихся в теплообмене между собой и с оживающим агентом.

В настоящее время техника псевдооживения используется более чем в 50 технологических процессах. Отмеченные качества псевдооживенного слоя позволили значительно интенсифицировать процессы сжигания топлива, сушки зерна и различных химических продуктов, процессы термической обработки, каталитического крекинга нефти и многие другие [6].

Описание лабораторной установки

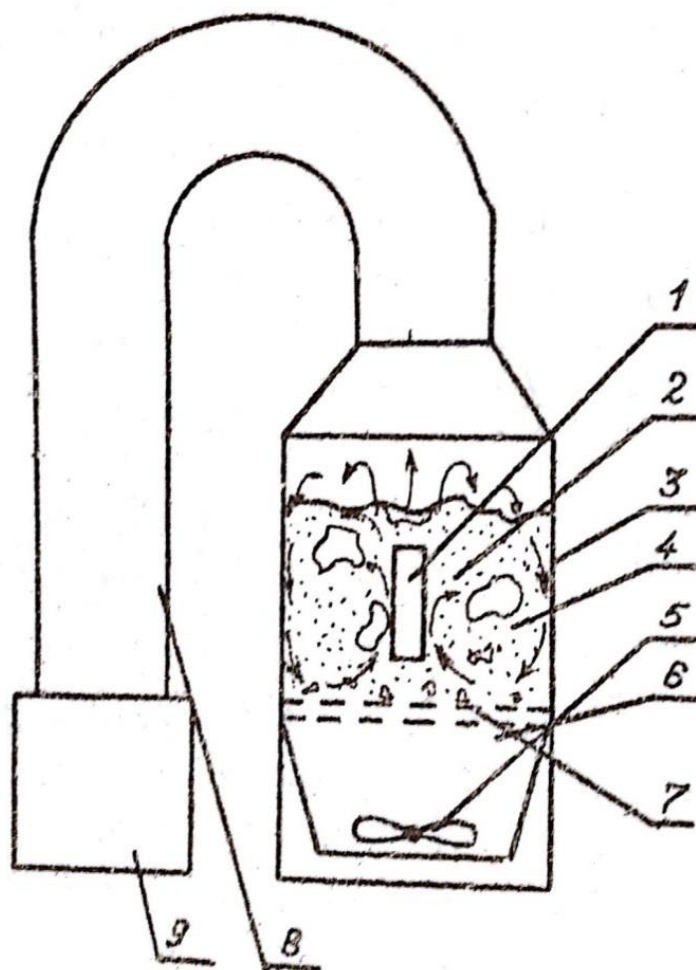


Рисунок 1

Лабораторная установка предназначена для исследования процессов псевдооживления и измерения пульсаций теплового потока на поверхностях, погруженных в слой. Она представляет собой камеру с прозрачными стенками 3 (рисунок 1). Дисперсный материал (промытый речной песок) насыпан на сетку 7 с ячейкой размером 0,2 x 0,2 мм. Сетка лежит на решетке 6, которая служит для "распыления" воздушного потока, создаваемого вентилятором 5.

Прошедшими через камеру воздух по трубопроводу 8 отводится в бункер 9, в котором собираются выброшенные частицы, и через фильтр выходит из установки.

В зоне развитого псевдооживления 2 располагается пластина с теплоотдающей поверхностью 1. Псевдооживленный слой 4 омывает пластину с двух сторон, создавая около ее поверхности циркуляционные токи.

Интенсивность процесса псевдооживления регулируется величиной расхода воздуха, который осуществляется изменением напряжения, подаваемого на двигатель вентилятора.

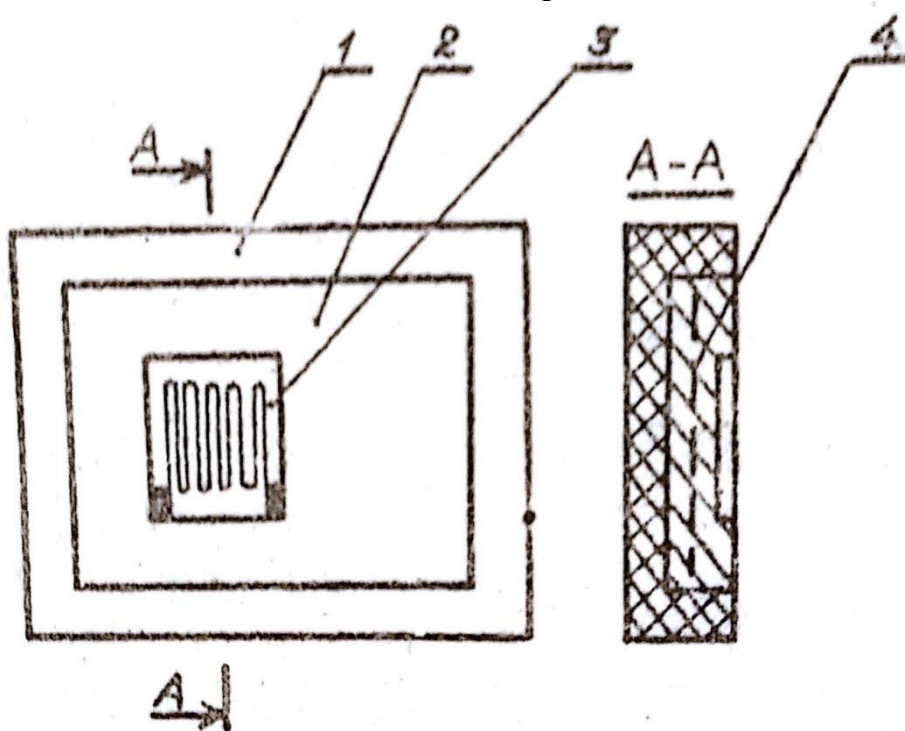


Рисунок 2

На рисунке 2 показано устройство пластины с теплоотдающей поверхностью. В текстолитовое основание 1 вставлена медная пластина 2 размерами 120 x 80 x 10 мм. На пластине установлен преобразователь теплового потока 3 (ПТП). Поверхности основания, медной пластины и ПТП находятся на одном уровне, чтобы не вносить дополнительного возмущения в поток. Внутри медной пластины равномерно по поверхности уложен нагреватель 4, создающий перегрев пластин относительно слоя.

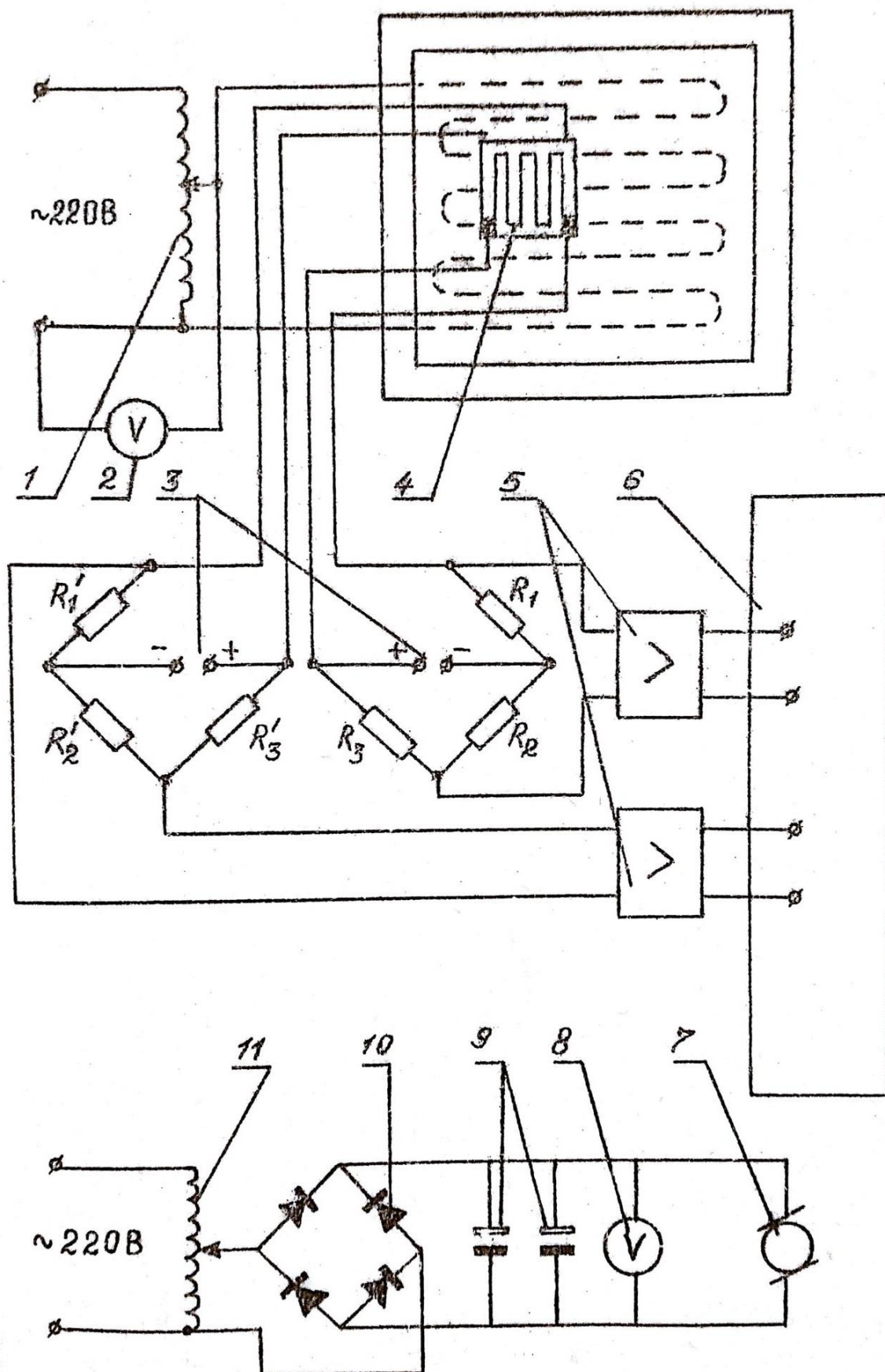


Рисунок 3

Электрическая схема лабораторной установки включает в себя измерительную часть – для измерения и записи сигналов с преобразователя теплового потока и силовую часть – для питания нагревателя и двигателя вентилятора (см. рисунок 3).

На рисунке 3 обозначено: 1 – лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) для питания цепи нагревателя; 2 – вольтметр переменного напряжения; 3 – источник стабилизированного напряжения; 4 – преобразователь теплового потока; 5 – усилители постоянного тока; 6 – шлейфный осциллограф; 7 – двигатель вентилятора; 8 – вольтметр постоянного напряжения; 9 – конденсаторы фильтра; 10 – диодный мост (выпрямитель); 11 - ЛАТР для питания цепи вентилятора.

Преобразователь теплового потока представляет собой пластину из ситалла 20×20 мм, на двух поверхностях которой расположены два медных термометра сопротивления. Термометры изготовлены методом напыления тонких пленок в вакууме и имеют толщину 1 мкм. Это дает возможность регистрировать изменения температуры поверхностей ПТП с частотой, не превышающей 100 Гц. Термометры сопротивления включены в измерительные мосты (рисунок 3), и сигналы, пропорциональные изменению температуры поверхностей ПТП, поступают с измерительных диагоналей мостов через усилители на запись. Пример записи процесса на ленте шлейфного осциллографа (Рисунок 4). Из осциллограммы видно, что пульсации температуры поверхности ПТП, обращенной к слою, происходят с частотой 5...10 Гц. До второй, тыльной, стороны ПТП доходят наиболее низкочастотные составляющие пульсаций с частотой $f \leq 1$ Гц.

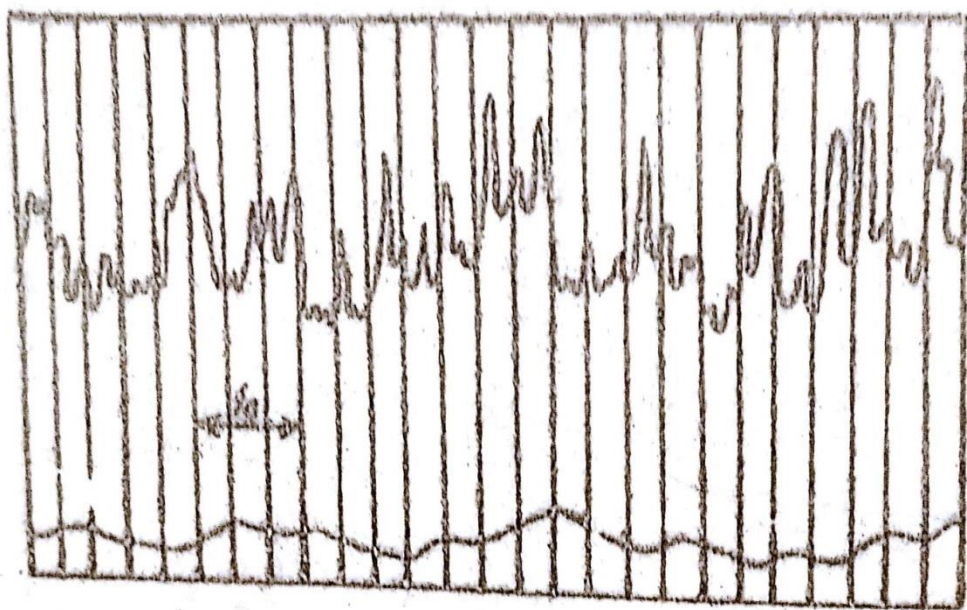


Рисунок 4

Для определения нестационарного теплового потока при различных условиях теплообмена на кафедре КТФиЭМ Университета ИТМО разработаны методы и устройства, которые можно с успехом применять при исследовании внешнего теплообмена в псевдооживленном слое [6]. Один из них базируется на приближенном решении уравнения теплопроводности для неограниченной пластины [7]:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial \bar{x}^2} = \frac{\partial v}{\partial F_0} (-1 \leq \bar{x} \leq 1; F_0 \geq 0), \quad (1)$$

при краевых условиях:

$$\begin{aligned} v(-1; F_0) &= v_1(F_0), \\ v(1; F_0) &= v_2(F_0), \\ v(\bar{x}; 0) &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где $v_1(F_0)=t_1(F_0)-t_0$; $v_2(F_0)=t_2(F_0)-t_0$ – перегревы поверхностей пластины относительно начальной температуры t_0 ; $\bar{x} = \frac{x}{L}$ – относительная координата; $2L$ – толщина пластины; $F_0 = \frac{a \cdot \tau}{L^2}$ – критерий Фурье; a – коэффициент температуропроводности материала.

Решение (1), (2) представляется для двух стадий процесса: первая стадия – от начального момента до некоторого времени F_0^* , когда в пластине существует изотермическая область и можно считать пластину полупространством; вторая стадия $F_0 > F_0^*$ – когда воздействия от граней достигают центра пластины и пользоваться моделью полупространства нельзя. Расчетные зависимости имеют вид:

$$\begin{aligned} q_I(F_0) &= \frac{\lambda n \sqrt{F_0^*}}{L} \cdot \left\{ \frac{v_1(F_0)}{\sqrt{F_0}} - \frac{1}{2} \cdot \int_0^{F_0} \left[\frac{v_1(F'_0) - v(F_0)}{(F_0 - F'_0)^{\frac{3}{2}}} \right] dF'_0 \right\}, \quad (3) \\ q_{II}(F_0) &= \frac{\lambda n \sqrt{F_0^*}}{L} \cdot \left\{ \frac{v_1(F_0)}{\sqrt{F_0}} - \frac{1}{2} \cdot \int_{F_0 - F_0^*}^{F_0} \left[\frac{v_1(F'_0) - v(F_0)}{(F_0 - F'_0)^{\frac{3}{2}}} \right] dF'_0 \right\} - \\ &\frac{\lambda}{L} \mu \int_0^{F_0 - F_0^*} \left\{ \left[\frac{1}{2} \cdot v_2(F'_0) + \left(n - \frac{1}{2} \right) \cdot v_1(F'_0) \right] \cdot \right. \\ &\left. e^{-\mu(F_0 - F'_0 - F_0^*)} \right\} dF'_0, \quad (4) \end{aligned}$$

где λ – теплопроводность материала; $F_0^* = 0,1$; $n = 1,78$; $\mu = 2,47$ – постоянные величины.

Порядок проведения опытов

Проведение исследований на установке методически целесообразно провести с использованием шлейфного осциллографа. Ниже дан порядок выполнения работы с использованием шлейфного осциллографа.

1. Включить тумблер "Сеть" осциллографа и тумблер "Термостат". После прогрева термостата блока гальванометра сигнальная лампа "Термостат" периодически загорается и гаснет. Это означает, что осциллограф готов к работе.
2. Включить ртутную лампу осциллографа. Кнопочным переключателем установить скорость протяжки фотобумаги 250 мм/с.
3. Подать питание на нагреватель и на двигатель вентилятора. По вольтметрам установить следующие напряжения: на нагревателе – 40 В, на двигателе – 24 В.
4. По мере повышения температуры датчика "зайчики" гальванометров начнут выходить за пределы экрана осциллографа. Изменив сопротивление магазинов R_2 и R'_2 , вернуть "зайчики" в нейтральное положение (соответствующее балансу моста).
5. После выхода датчика в квазистационарный режим ("зайчики" гальванометров колеблются около положения равновесия) произвести запись процесса на фотобумагу, включив на 2 – 3 секунды тумблер "Двигатель".

Обработка результатов эксперимента

На рисунке 5 показана запись пульсаций температуры поверхностей ПТП. Временной интервал между метками (поперечные полосы) составляют 0,02 с. Студенту необходимо произвести оцифровку полученных кривых.

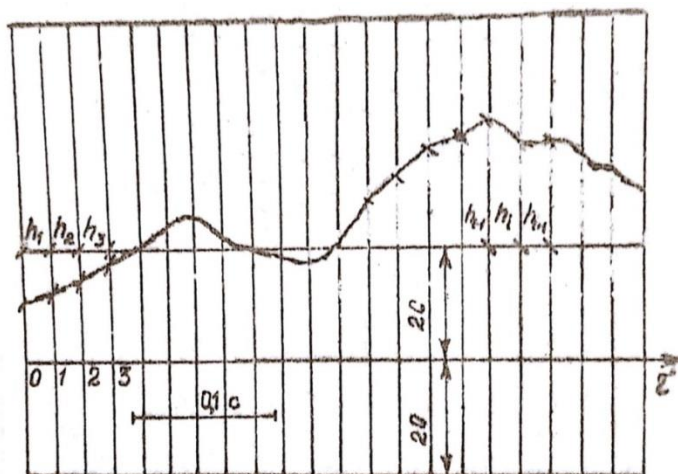


Рисунок 5

Для этого следует:

- 1) провести на осциллограмме две прямые, отстоящие от центра на 20 мм. Они соответствуют нейтральному положению гальванометров;
- 2) в начале ленты выбрать точку отсчета и от нее провести отсчет в миллиметрах ординат кривых $t_1(\tau)$ и $t_2(\tau)$ через 0,02 с в течение 0,5 с. При этом отсчет проводить от указанных прямых (см. п.1);
- 3) определить по показанию магазинов R_2 и R'_2 средние температуры поверхностей датчика (ПТП);
- 4) определить температуру поверхностей ПТП в каждый момент времени по формуле:

$$t(\tau) = \bar{t} + \tilde{t}(\tau), \quad (5)$$

где \bar{t} – средняя температура; \tilde{t} – пульсирующая составляющая; ($\tilde{t} = k \cdot h = 0,07$, $k = 0,07$ К/мм – постоянная измерительной схемы)

Результаты свести в таблицу по приводимому образцу:

$\tau, \text{с}$	$h, \text{мм}$	$\tilde{t}_1, \text{К}$	$t_1(\tau), \text{К}$	$h, \text{мм}$	$\tilde{t}_2, \text{К}$	$t_2(\tau), \text{К}$
0						
0,02						
0,04						
.						
.						
.						
.						
0,50						

Данные таблицы являются входной информацией для расчета теплового потока.

Контрольные вопросы

1. Какие слои являются псевдооживленными?
2. В чем сущность способа измерения пульсирующих тепловых потоков?
3. Как устроен датчик для измерения тепловых потоков?
4. Какие существуют источники погрешности при изменении переменного потока?
5. Во сколько раз увеличивается коэффициент теплоотдачи поверхности, помещённой в псевдооживленный слой?
6. В каких технологических процессах псевдооживление позволяет достигнуть высоких результатов и почему?

Определение тепловых потерь источников энергии различной природы

Цель работы – ознакомление с методами и приборами для измерения изменяющейся во времени мощности тепловых потерь источников энергии различной природы.

Работа проводится на динамическом калориметре, предназначенном для исследования теплоотдачи и определения теплопродукции теплокровных животных. Этот прибор может применяться также для измерения полной теплоемкости многосоставных объектов (например, модулей радиоэлектронного аппарата); для определения тепловыделений в процессах твердения материалов на основе вяжущих веществ (например, теплоты гидратации цементов); для измерения тепловых потерь различных радиотехнических деталей и устройств.

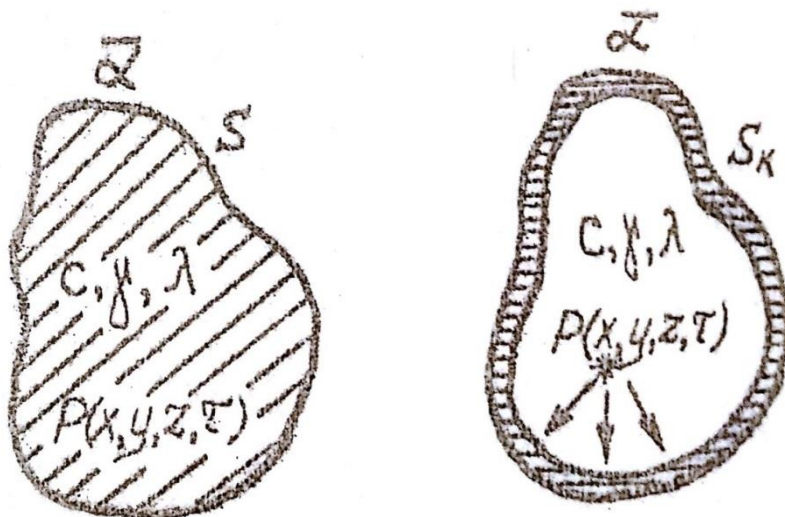


Рисунок 1

Рассмотрим тело произвольной формы (рисунок 1, а), мощность источников в котором является функцией координат и времени, т.е. $P(x, y, z, t)$.

Тело находится в жидкой газообразной среде, теплообмен с которой подчиняется закону Ньютона.

Количество тепла ΔQ , выделившееся внутри тела, частично идет на изменение энтальпии тела ΔQ_1 , а остальная часть рассеивается в среду, т.е.

$$\Delta Q = \Delta Q_1 + \Delta Q_2, \quad (1)$$

Количество тепла dQ_1 , поглощенное элементом объема dV за время $\Delta\tau$, составляет:

$$\Delta Q_1 = C_p \cdot \gamma \cdot dV \cdot \Delta\vartheta, \quad (2)$$

где C_p , γ – удельная теплоёмкость и плотность тела; $\Delta\vartheta = \Delta(t-t_c)$ – изменение температуры перегрева объема dV за время $\Delta\tau$; t_c – температура внешней среды.

Все тело за промежуток времени $\Delta\tau$ поглотит следующее количество тепла:

$$dQ_1 = \int_V dQ_1 = \int_V C_p \gamma \Delta\vartheta dV = C_p \gamma \int_V \Delta\vartheta dV = C \Delta\vartheta_V, \quad (3)$$

где $\Delta\vartheta_V$ – изменение среднеобъемной температуры перегрева тела за время $\Delta\tau$,

$$\Delta\vartheta_V = \frac{1}{V} \int_V \Delta\vartheta dV. \quad (4)$$

Найдем величину ΔQ_2 . Элемент поверхности dS тела за время $\Delta\tau$ отдает в среду некоторое количество энергии dQ_2 :

$$dQ_2 = \alpha \vartheta|_{dS} \cdot dS \cdot \Delta\tau, \quad (5)$$

где $\vartheta|_{dS}$ – температура перегрева элемента поверхности dS .

Со всей поверхности S тела в среду рассеивается следующее количество энергии:

$$\Delta Q_2 = \int_S dQ_2 = \int_S \alpha \cdot \vartheta \cdot dS \cdot \Delta\tau, \quad (6)$$

Если известна некоторая средняя величина коэффициента теплоотдачи $\bar{\alpha}$, то выражение (6) можно переписать в виде:

$$\Delta Q_2 = \bar{\alpha} \cdot S \cdot \vartheta_s \cdot \Delta\tau, \quad (7)$$

где ϑ_s – среднеповерхностная температура перегрева тела,

$$\vartheta_s = \frac{1}{S} \int_S \vartheta \cdot dS. \quad (8)$$

Количество тепла ΔQ , выделившееся внутри тела, составляет:

$$\Delta Q = P \cdot \Delta \tau, \quad (9)$$

где P – мощность источника в теле.

Подставив значения ΔQ , ΔQ_1 и ΔQ_2 в уравнение (1), получим:

$$P = \frac{1}{mF} \cdot \frac{\Delta \vartheta_V}{\Delta \tau} + \frac{1}{F} \vartheta_S, \quad (10)$$

где через m и F обозначены следующие комплексы величин:

$$m = \frac{\bar{\alpha} S}{c_p \gamma V}, \quad (11)$$

$$F = \frac{1}{\bar{\alpha} S}. \quad (12)$$

После предельного перехода $\Delta \tau \rightarrow 0$ уравнение (10) примет вид:

$$P = \frac{1}{mF} \cdot \frac{d\vartheta_V}{d\tau} + \frac{1}{F} \vartheta_S. \quad (13)$$

Дифференциальное уравнение (13) связывает мощность источников энергии с температурой, геометрическими и физическими параметрами тела.

В частном случае среднеповерхностная ϑ_s и среднеобъемная ϑ_v температуры могут быть равны, например, когда температурное поле в теле равномерное, или когда тело представляет собой тонкую оболочку (камеру) (Рисунок 1, б) с неравномерным полем температур на поверхности при отсутствии градиента температуры по ее толщине. Практический интерес представляет случай, когда источник расположен внутри камеры. При этом $\vartheta_v = \vartheta_s = \vartheta$ выражение (13) принимает вид:

$$P = \frac{1}{mF} \cdot \frac{d\vartheta}{d\tau} + \frac{1}{F} \vartheta. \quad (14)$$

Уравнение (14) используется для определения мощности, выделяемой источником, расположенным в камере. Естественно, что при этом не учитывается энергия, которая поглощается самим источником за счет его теплоемкости.

В формулах (13) и (14) параметры m и F могут определяться градуировкой по известной мощности электрического нагревателя.

Рассмотренный метод послужил основой для разработки нескольких моделей динамических биокалориметров для измерения теплотерь живых организмов. Однако калориметры подобного типа дают возможность проводить исследования только при комнатной температуре, так как для измерения температуры калориметра необходимо изменять температуру окружающей среды. Кроме того, значительная погрешность калориметров определяется нестабильностью конвективного коэффициента теплообмена на поверхности оболочки.

Изменения $\bar{\alpha}$ происходят вследствие действия внешних тепловых помех, а именно: изменения температуры среды, окружающей калориметр; появления теплового потока на поверхности устройства.

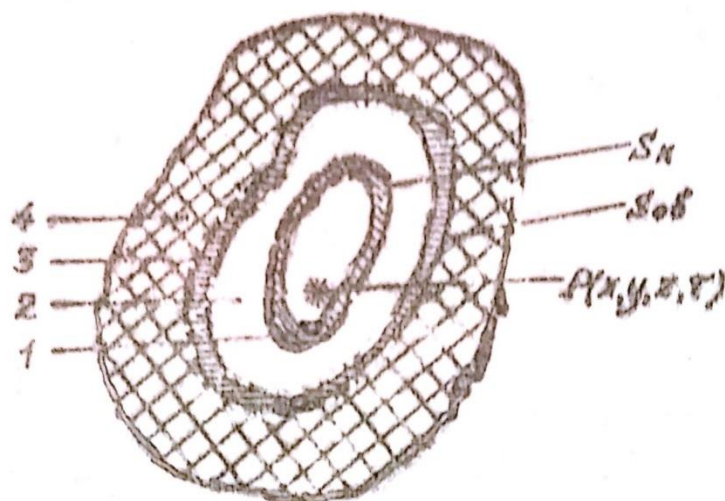


Рисунок 2

Модель калориметрического устройства, позволяющего проводить измерения в условиях внешних тепловых помех (рисунок 2), состоит из камеры 1, оболочки 3, отдельной от камеры тонкой замкнутой воздушной прослойкой 2, в которой отсутствует конвекция, и изоляции 4. Температура оболочки 3 с помощью термостатирующих устройств может поддерживаться на заданном уровне.

Тепло, выделяемое источником, передаётся камере, увеличивая ее теплосодержание, частично проходит через воздушный зазор к оболочке и рассеивается в окружающую среду.

Уравнение теплового баланса для системы "источник мощности – камера – зазор – оболочка" имеет вид:

$$P(\tau) = C_K \frac{dt_K}{d\tau} + KS_K [t_K(\tau) - t_{об}(\tau)], \quad (15)$$

где $t_K(\tau)$ и $t_{об}(\tau)$ – среднеповерхностные температуры камеры и оболочки; C_K, S_K – полная теплоемкость и площадь наружной поверхности камеры.

Представим уравнение (15) в виде:

$$P(\tau) = \frac{1}{m'F'} \cdot \frac{dt_K}{d\tau} + \frac{1}{F'} [t_K(\tau) - t_{об}(\tau)], \quad (16)$$

$$m' = \frac{KS_K}{C_K}, \quad (17)$$

$$F' = \frac{1}{KS_K}, \quad (18)$$

где K – коэффициент теплопередачи в прослойке между камерой и оболочкой.

Таким образом, измерение мощности, рассеиваемой источником, сводится к измерению скорости нагреве камеры $dt/d\tau \approx \Delta t_K / \Delta \tau$ и перепада температур между камерой и оболочкой.

Погрешность определения мощности

Отличительной особенностью рассмотренного метода определения нестационарных тепловых потоков является возможность расчета погрешности измерения $P(\tau)$ на стадии проектирования калориметров. Остановимся на погрешности определения мощности в условиях внешних тепловых помех более подробно.

Поскольку в уравнении (16) внешние тепловые помехи учтены, они не должны оказывать влияния на результат измерения рассеиваемой объектом мощности. Следовательно, любая величина помех является принципиально допустимой. Однако погрешность определения мощности $P(\tau)$ оказывается различной при разном уровне и характере помех. Для обоснования этого положения составим формулу погрешности. При этом предположим, что систематические погрешности исключены или учтены соответствующими поправками; случайные погрешности подчинены нормальному закону распределение. Тогда из уравнения (1) согласно работе [8] имеем:

$$-\frac{\Delta P}{P} = \sqrt{\frac{a+b \cdot X^2+c \cdot Y^2}{(X+Y)^2}}, \quad (19)$$

$$X = t_K(\tau) - t_{об}(\tau), \quad (20)$$

$$Y = \frac{1}{m'} \cdot \frac{dt_K}{d\tau}. \quad (21)$$

Как следует из литературы, параметры a , b , c мало зависят от теплового режима камеры и оболочки и в первом приближении их можно считать постоянными величинами. Тогда изменение погрешности $\Delta P/P$ за время проведения опыта связано только с изменением величия X и Y , т.е. с изменением теплового режима камеры и оболочки. Зависимости погрешности от теплового режима, построенные по формуле (19) для рассматриваемого калориметра (Рисунок 3).

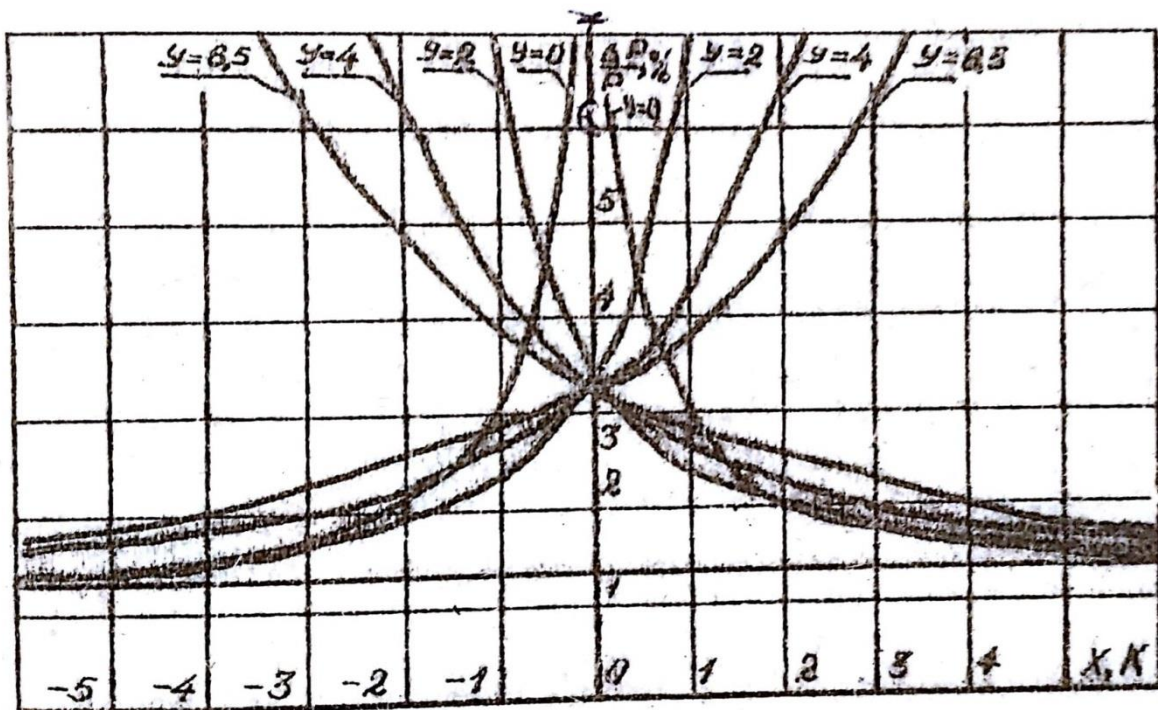


Рисунок 3

Как следует из формулы (19), погрешность $\Delta P/P$ растет при $X/Y \rightarrow -1$ и становится равной бесконечности при $\lim_{X/Y \rightarrow -1} \frac{\Delta P}{P} = \infty$.

Например, изменение X от 0 до 1 (Рисунок 3) вызывает повышение погрешности от 3,5 до 7%, и при $X=2$ погрешность $\Delta P/P = \infty$.

Таким образом, зная на стадии проектирования или в данном случае из опыта температурный режим калориметра, можно оценить величину погрешности $\Delta P/P = f(\tau)$, меняющуюся за время проведения опыта.

Описание прибора

Рассматриваемый динамический калориметр предназначен для определения теплопродукции теплокровных животных средних размеров. Поскольку к исследованию биологических объектов предъявляется ряд специфических требований, калориметр обычно оснащают системами вентиляции, газоанализа и измерения влажности. Однако при выполнении данной лабораторной работы указанные системы не используют.

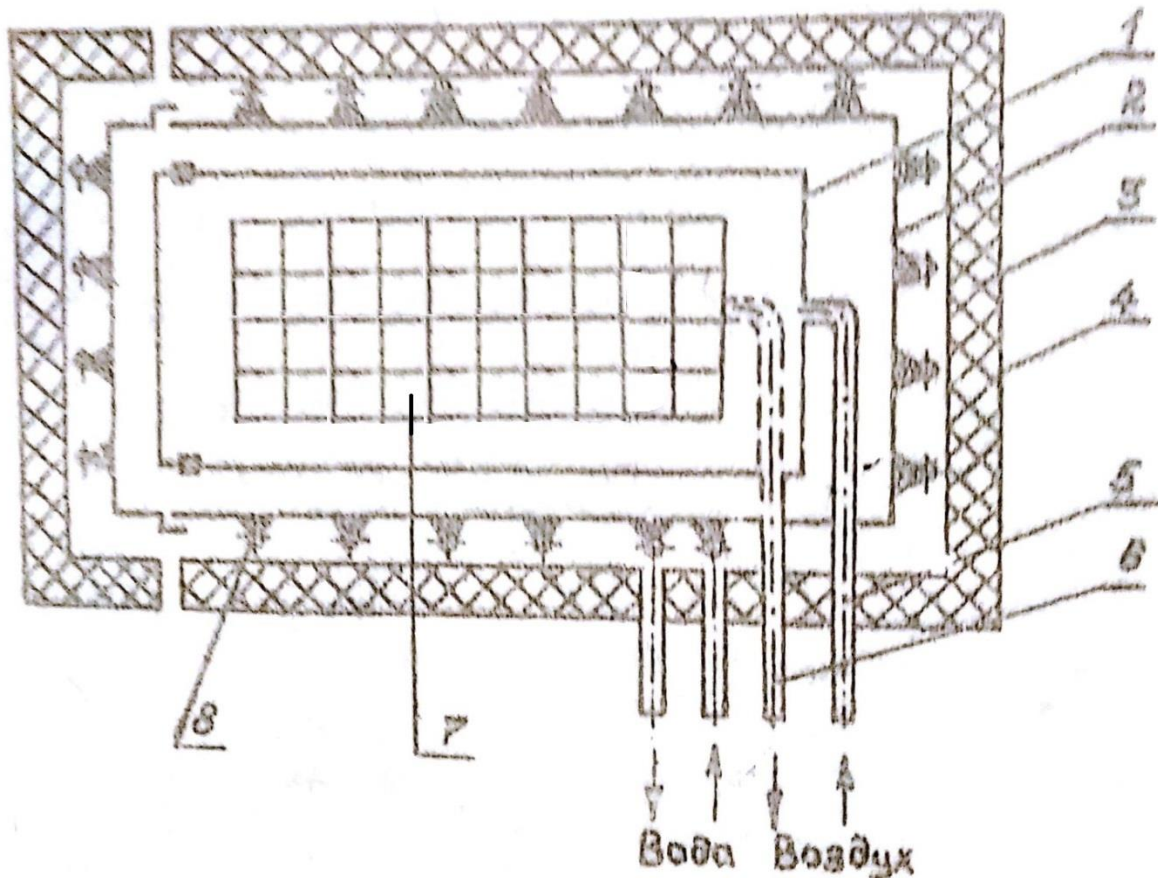


Рисунок 4

Прибор (рисунок 4) имеет настольное оформление и состоит из камеры 1, оболочки 2, изоляции 3 и наружного кожуха 4. Камера имеет цилиндрическую форму и состоит из корпуса и крышки. Для обеспечения герметичности камеры крышку присоединяют к корпусу через уплотняющую резиновую прокладку. Внутри камеры устанавливают клетку 7 с исследуемым животным. Камера и оболочка жестко соединены через теплоизоляционные втулки. На оболочку напаян змеевик 8, по которому пропускают термостатированную жидкость. Температура жидкости поддерживается в пределах $4 - 20^{\circ}\text{C}$ стандартным жидкостным термостатом.

При исследовании живых организмов непрерывная вентиляция камеры осуществляется с помощью вытяжного вентилятора и воздуховода. Входная трубка 5 воздуховода припаяна к оболочке, а выходная 6 – к камере калориметра. Длина и сечение трубок выбраны так, что воздух попадает в камеру с температурой оболочки, а продукты газообмена выходят из неё с температурой камеры. Это позволяет учитывать унос тепла протекающим воздухом.

Для измерения температуры камеры и оболочки применяют нестандартные медные термометры сопротивления. Сопротивление термометров камеры и оболочки равны 59 Ом при 0°C.

Для измерения температуры исследуемого объекта в камере прибора предусмотрено шесть термопар, которые выводят из камеры через герметичное уплотнение и подключают к блоку холодных спаев (БХС). От БХС монтаж в приборе ведется медным многожильным проводом. Термопары переключателем Π_2 подключаются к внешнему потенциометру.

Схема изменения мощности нагревателя

В работе определяется мощность потерь электрического нагревателя, помещенного в калориметр (Рисунок 5). Погрешность измерения мощности оценивается на основе сопоставления результатов измерения мощности нагревателя с помощью калориметра и непосредственным измерением ее электроизмерительными приборами.

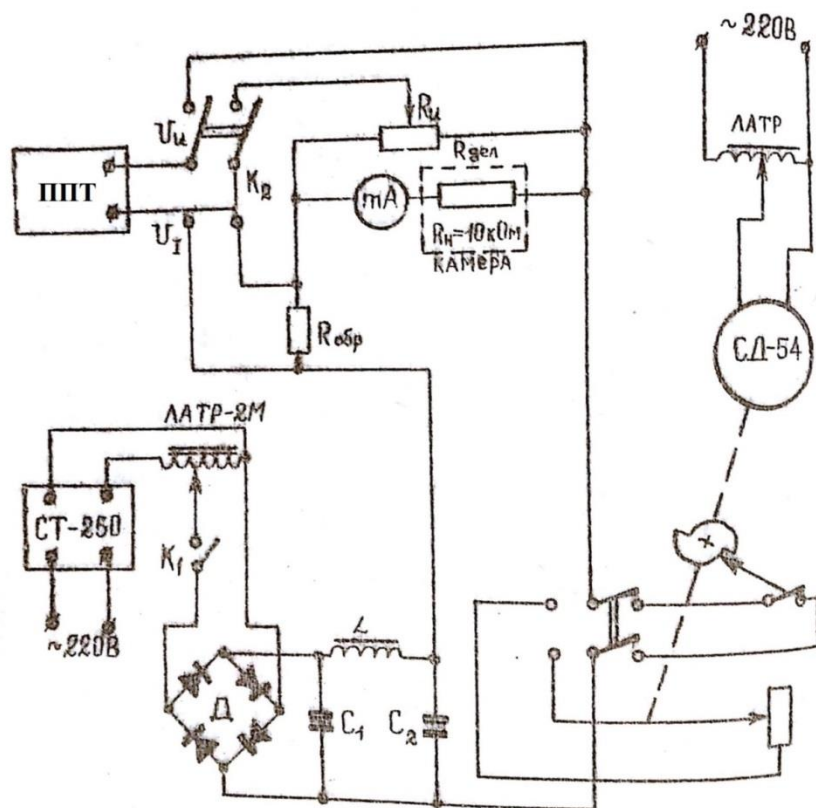


Рисунок 5

Проволочный нагреватель R_n помещается в камеру калориметра. Нагреватель питается выпрямленным и стабилизированным током. Ток регулируется ЛАТРОм. Пульсации выпрямленного тока сглаживаются LC-фильтром. Ориентировочно значение тока в цепи нагревателя задается по миллиамперметру mA , а точнее, его измерение проводится с помощью образцового сопротивления $R_{обр}$ и потенциометра постоянного тока.

Падение напряжения на нагревателе измеряется с помощью потенциометра. Переключатель K_2 (расположен на панели прибора) позволяет проводить измерения одним прибором ППТ. Эта же схема измерения мощности применяется и для градуировки биокалориметра, в процессе которой определяют значения $m'(t)$ и $F'(t)$.

Ток и падение напряжения на нагревателе определяют из соотношений:

$$I_H = K \frac{U_1}{R_{обр}}, \quad (22)$$

$$U_H = U_{и} \frac{R_{дел}}{U_{и}}, \quad (23)$$

$$P_H = I_H U_H, \quad (24)$$

где $R_{дел}=10^5$ Ом, $R_{обр}=1,065$ Ом, $R_{и}=10$ Ом, $K=0,99$.

Коэффициент K учитывает, что через нагреватель проходит ток $I_H=0,99I_{общ}$.

Порядок выполнения работы

В работе предусматривается измерение с помощью калориметра переменной во времени мощности электрического нагревателя и количества тепла, выделяемого за определенный промежуток времени. Опыт проводится при атмосферном давлении и температуре оболочки, указываемой преподавателем.

Тепловой поток, рассеиваемый нагревателем, изменяется по различным зависимостям, устанавливаемым преподавателем с помощью блока управления. Величина рассеиваемой мощности измеряется миллиамперметром и потенциометром или калориметром. Далее строятся зависимости $P(\tau)$, рассчитанные различными способами, и устанавливается погрешность измерения потока $P(\tau)$ с помощью калориметра.

При выполнении работы студенту необходимо:

1. Подготовить таблицу для записи опыта (таблица).

№ ПП	τ , с	Режим работы нагрев.	R_K , Ом	t_K , °С	$R_{об}$, Ом	$t_{об}$, °С	$\Delta t = t_K - t_{об}$, °С	$m \cdot 10^{-3}$, г	$F \cdot 10^{-3}$, дел/Вт	dt_K/dt , К/с	$P_{оп}$, Вт	$P_{эт}$, Вт	δ , %

- Включить тумблер "Сеть" цифрового омметра.
- Включить тумблеры "Питание" и "Двигатель" на блоке управления.
- Установить переключатель "Режим" в положение, указанное преподавателем.
- Снять в один и тот же момент времени показания миллиамперметра и омметра в положениях "Камера" и "Оболочка" (при этом воспользоваться переключателем на калориметре). Отметим, что сопротивление оболочки меняется незначительно, и регистрировать его можно реже, чем сопротивление камеры.
- В процессе измерений отметить моменты выключения питания на нагревателе калориметра (стрелка миллиамперметра показывает "0").
- Регистрировать непрерывно (через 5 с) показания омметра и отметить момент начала импульса на нагревателе калориметра (отклонение стрелки миллиамперметра).
- Измерить величины тока, подаваемого на нагреватель, с помощью миллиамперметра, а напряжения – с помощью потенциометра, встроенного в блок управления.
- Выключить установку (тумблеры "Питание" и "Двигатель" на блоке управления) и цифровой омметр.

Задание по работе

- Ознакомиться с теорией метода.
- Ознакомиться с описанием и конструкцией калориметра.
- Провести измерение переменной во времени мощности электрического нагревателя и количества тепла, выделяемого за определенный промежуток времени.
- Построить по полученным данным графики изменения температуры, камеры и оболочки, используя градуировочную кривую (Рисунок 6).
- Рассчитать величину потока $P(\tau)$ и построить зависимость $P(\tau)$ (значения коэффициентов $m' = m'(t)$ и $F' = F'(t)$ Рисунок 7).
- Определить погрешность измерения на калориметре $P(\tau)$ по формуле $\delta P = (P_{оп} - P_{эм}) / P_{эм}$.

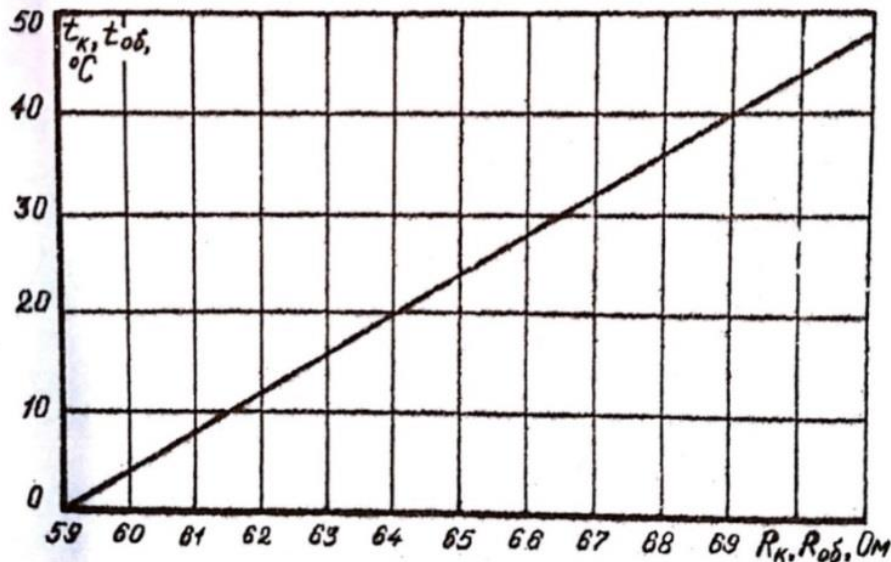


Рисунок 6

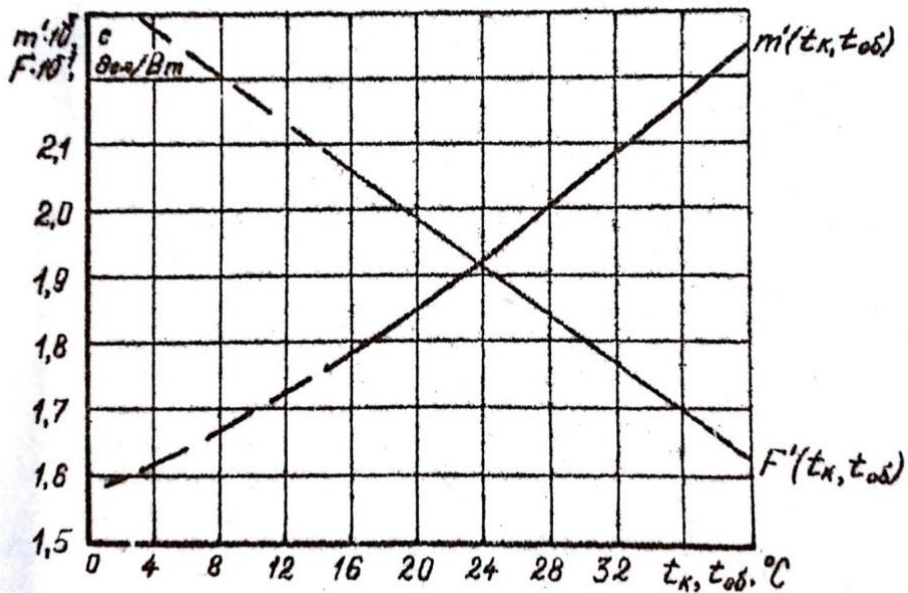


Рисунок 7

Контрольные вопросы

1. В чем суть метода определения нестационарного теплового потока в условиях внешних тепловых помех?
2. Как скажется на результате измерений $P(\tau)$ условие $\vartheta_v \neq \vartheta_s$.
3. В чем отличительная особенность метода определения потока $P(\tau)$ с помощью рассмотренных калориметров?
4. Каковы пределы изменения погрешности определения потока $P(\tau)$?
5. Как измеряется температура камеры $t_k(\tau)$ и оболочки $t_{ob}(\tau)$?
6. Как измеряется мощность нагревателя?
7. Как задаются различные законы изменения мощности нагревателя?
8. В чем недостатки калориметров с одной оболочкой?

9. Что способствует стабильности измерения потока $P(\tau)$ в конструкции калориметра с двумя оболочками?
10. Что характеризует температурный режим калориметра?
11. Как учитывается унос тепла воздухом, протекающим через калориметр при вентиляции?
12. Необходимо ли термостатирование оболочки калориметра?
13. Какие исследования можно проводить на динамическом калориметре? Каковы уровни температур давлений?
14. Каковы требования к нагревателю, расположенному в камере калориметра?
15. От чего зависит погрешность определения теплового потока $P(\tau)$?
16. Каковы динамические характеристики рассматриваемого калориметра?
17. Как уменьшаются и как учитываются внешние тепловые помехи?
18. Какие параметры являются "постоянными" калориметра и как они определяются?
19. На чем основывается выбор теплофизических параметров камеры и оболочки?

Список литературы:

1. Пилипенко Н.В., Приборы и методы нестационарной теплотметрии. Учебное пособие – СПб: Университет ИТМО, 2016. – 82 с.
2. Дульнев Г.Н., Пилипенко Н.В. Об измерении нестационарных потоков различной длительности действия – Изв. ВУЗов СССР. Приборостроение, 1977, т. XX, №9.
3. Дульнев Г.Н., Пилипенко Н.В., Кузьмин В.А. Об инерционности измерений с помощью тепломеров "вспомогательная стенка". – ИФЖ, 1980, т.39, №2.
4. Кузьмин В.А., Пилипенко Н.В. Устройство для исследования тепломеров в нестационарных условиях. – Изв. ВУЗов СССР. Приборостроение, 1978, т.21, №2.
5. Геращенко О.А. Основы теплотметрии – Киев: Науковая думка 1971.
6. Пилипенко Н.В. Методы и приборы для измерения тепловых величин в энергоёмких технологических процессах. Учебное пособие – СПб: Университет ИТМО, 2017. – 65 с.
7. Дульнев Г.Н. и др. Измерение нестационарных тепловых потоков датчиками "вспомогательная стенка" – ИФЖ, 1979, т. 37, №1.
8. Пилипенко Н.В. Основы проектирования комбинированных приёмников теплового потока. Учебное пособие – СПб: Университет ИТМО, 2016. – 52 с.

Миссия университета – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

КАФЕДРА ТЕПЛОФИЗИКИ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ ТЕПЛО-ХЛАДОТЕХНИКИ

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 по 2018 год заведующим кафедрой являлся профессор, доктор технических наук А.В. Шарков. В 2017 году кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга была объединена с рядом других кафедр и стала называться кафедра теплофизики и теоретических основ тепло-хладотехники. Заведующим кафедры стал профессор, доктор технических наук И.В. Баранов.

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, Н.В. Пилипенко 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.

Николай Васильевич Пилипенко

**МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЧНЫХ
УСЛОВИЙ ПРИ СТАЦИОНАРНОМ ТЕПЛООБМЕНЕ**

Учебное пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел

Университета ИТМО

197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49