

Министерство образования Республики Беларусь

**Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»**

Кафедра «Промышленная теплоэнергетика и экология»

А. В. Овсянник, И. Н. Дружкин, Ю. А. Степанишина

ТЕПЛОМАССОБМЕН

ПРАКТИКУМ

**по выполнению лабораторных работ
по одноименному курсу для студентов специальностей
1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика»
и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация
энергооборудования организаций»
дневной и заочной форм обучения**

Электронный аналог печатного издания

Гомель 2017

УДК 621.1.016.4(075.8)
ББК 31.312я73
О-34

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 9 от 30.05.2016 г.)*

Рецензент: зав. каф. «Электроснабжение» ГГТУ им. П. О. Сухого
канд. техн. наук *А. О. Добродей*

Овсянник, А. В.

О-34 Теплообмен : практикум по выполнению лаборатор. работ по одноимен. курсу для студентов специальностей 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика» и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования организаций» днев. и заоч. форм обучения / А. В. Овсянник, И. Н. Дружкин, Ю. А. Степанишина. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2017. – 77 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-535-338-7.

Включены следующие разделы: теплопроводность твердых и сыпучих тел, нестационарная теплопроводность, конвективный теплообмен, теплообмен излучением, теплопередача.

Для студентов специальностей 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика» и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования организаций» дневной и заочной форм обучения.

**УДК 621.1.016.4(075.8)
ББК 31.312я73**

ISBN 978-985-535-338-7

© Овсянник А. В., Дружкин И. Н.,
Степанишина Ю. А., 2017
© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2017

Лабораторная работа № 1
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА
ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ
МЕТОДОМ ПЛАСТИНЫ

Цель работы: изучение явления теплопроводности и методики определения ее параметров в стационарном режиме для твердых тел, измерение коэффициента теплопроводности заданного образца, определение его температурной зависимости.

Теоретическая часть

Теплопередача, или теплообмен, – учение о самопроизвольных необратимых процессах распространения теплоты в пространстве. Под процессом распространения теплоты понимается обмен внутренней энергией между отдельными элементами, областями рассматриваемой среды.

Перенос теплоты осуществляется тремя основными способами: теплопроводностью, конвекцией и тепловым излучением.

Теплопроводность представляет собой молекулярный перенос теплоты в телах (или между ними), обусловленный переменностью температуры в рассматриваемом пространстве. Теплопроводность в чистом виде большей частью имеет место лишь в твердых телах.

Конвекция возможна только в текучей среде. Под конвекцией теплоты понимают процесс ее переноса при перемещении объемов жидкости или газа (текучей среды) в пространстве из области с одной температурой в область с другой. Конвекция теплоты всегда сопровождается теплопроводностью.

Тепловое излучение – процесс распространения теплоты с помощью электромагнитных волн, обусловленный только температурой и оптическими свойствами излучающего тела; при этом внутренняя энергия тела (среды) переходит в энергию излучения. Процесс превращения внутренней энергии вещества в энергию излучения, переноса излучения и его поглощения веществом называется теплообменом излучением.

Совместный процесс переноса теплоты конвекцией и теплопроводностью называется *конвективным теплообменом*.

В инженерных расчетах часто определяют конвективный теплообмен между потоками жидкости или газа и поверхностью твердого

тела; этот процесс конвективного теплообмена называют *конвективной теплоотдачей* или *теплоотдачей*.

Объектом изучения в данной работе является теплопроводность, механизм которой заключается в обмене энергией между микрочастицами в сплошной среде. В металлах перенос теплоты осуществляется путем движения (диффузии) свободных электронов и в незначительной степени за счет упругих колебаний кристаллической решетки. В жидкостях и в твердых телах, являющихся диэлектриками, теплопроводность осуществляется путем непосредственной передачи теплового движения молекул и атомов соседним частицам вещества. В газах перенос теплоты теплопроводностью происходит вследствие обмена энергией при соударении молекул, имеющих различную скорость теплового движения (путем диффузии молекул и атомов).

Аналитическое исследование теплопроводности сводится к изучению пространственно-временного изменения температуры, т. е. к нахождению уравнения

$$t = f(x, y, z, \tau). \quad (1.1)$$

Уравнение (1.1) представляет математическое выражение температурного поля. Таким образом, *температурное поле* есть совокупность значений температуры во всех точках изучаемого пространства для каждого момента времени.

Когда температура изменяется с течением времени и от одной точки к другой, тогда наблюдается неустановившийся тепловой режим с нестационарным температурным полем. Если тепловой режим является установившимся, то температура в каждой точке поля с течением времени остается неизменной и такое температурное поле называется стационарным.

Если соединить точки тела, имеющие одинаковую температуру, получим поверхность равных температур, называемую изотермической. Так как одна и та же точка тела не может одновременно иметь различные температуры, то изотермические поверхности не пересекаются. Они либо оканчиваются на поверхности тела, либо целиком располагаются внутри самого тела.

На рис. 1.1 приведены изотермы, температуры которых отличаются на Δ .

Наибольший перепад температуры на единицу длины происходит в направлении нормали к изотермической поверхности. Возрастание температуры в направлении нормали к изотермической поверхности характеризуется градиентом температуры.

Градиент температуры есть вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности в сторону возрастания температуры и численно равный производной от температуры по этому направлению, т. е.

$$\text{grad } t = \vec{n}_0 \frac{\partial t}{\partial n}, \quad (1.2)$$

где \vec{n}_0 – единичный вектор, нормальный к изотермической поверхности и направленный в сторону возрастания температуры; $\frac{\partial t}{\partial n}$ – производная температура по нормали n , величина $\frac{\partial t}{\partial n}$ в направлении убывания температуры отрицательна.

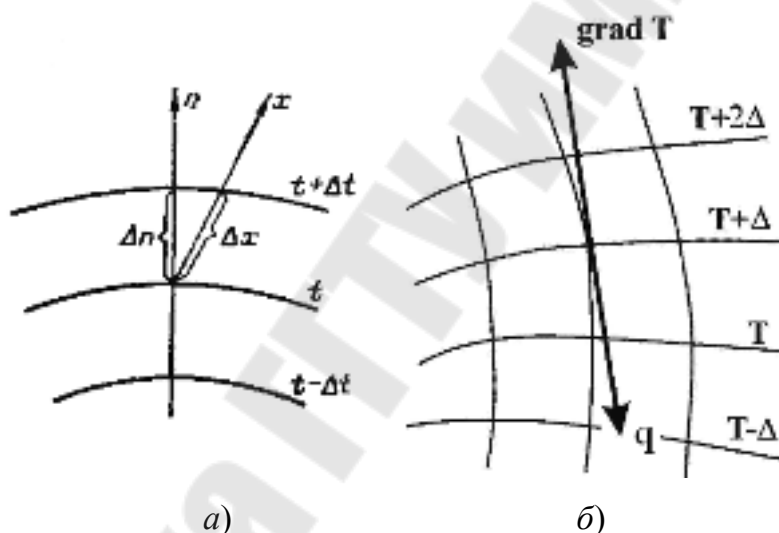


Рис. 1.1. Изотермы (а) и направления векторов градиента температуры и плотности теплового потока (б)

Явление теплопроводности в стационарном режиме описывается законом Фурье, который устанавливает, что количество теплоты dQ_τ , Дж, проходящее через элемент изотермической поверхности dF , м^2 , за промежуток времени $d\tau$, с, пропорционально температурному градиенту $\frac{\partial t}{\partial n}$:

$$dQ_\tau = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} dF \cdot d\tau. \quad (1.3)$$

Знак «минус» показывает, что вектора теплового потока (плотности теплового потока) и градиента температуры направлены в противоположные стороны. Вектор градиента температуры направлен в сторону увеличения температуры, а перенос теплоты происходит в направлении ее уменьшения.

Опытным путем установлено, что коэффициент пропорциональности в уравнении (1.3) есть физический параметр вещества. Он характеризует способность вещества проводить теплоту и называется коэффициентом теплопроводности λ , Вт/м · К. В общем случае коэффициент теплопроводности зависит от температуры, давления и рода вещества.

Коэффициент теплопроводности газов заметно не меняется с изменением давления, а с повышением температуры возрастает. Коэффициент теплопроводности газов лежит в пределах от 0,006 до 0,6 Вт/(м · К). Коэффициенты теплопроводности водяного пара и других реальных газов, существенно отличающихся от идеальных, сильно зависят от давления и температуры.

У большинства жидкостей с повышением температуры коэффициент теплопроводности убывает, исключение составляют вода и глицерин. Коэффициент теплопроводности капельных жидкостей лежит примерно в пределах от 0,07 до 0,7 Вт/(м · К). При повышении давления коэффициенты теплопроводности жидкостей возрастают.

В металлах носителем тепловой и электрической энергии являются электроны, поэтому коэффициенты тепло- и электропроводности пропорциональны друг другу. При повышении температуры вследствие усиления тепловых неоднородностей рассеивание электронов увеличивается. Это влечет за собой уменьшение коэффициентов тепло- и электропроводности чистых металлов. При наличии разного рода примесей коэффициент теплопроводности металлов резко убывает. Последнее можно объяснить увеличением структурных неоднородностей, которые приводят к рассеиванию электронов. В отличие от чистых металлов коэффициенты теплопроводности сплавов при повышении температуры увеличиваются.

В твердых телах – диэлектриках (неметаллы) – с повышением температуры коэффициент теплопроводности обычно увеличивается. Как правило, для материалов с большей объемной плотностью коэффициент теплопроводности имеет более высокое значение. Влияние объемной плотности на коэффициент теплопроводности объясняется тем, что теплопроводность заполняющего поры воздуха значительно меньше, чем твердых компонентов пористого материала.

Коэффициент теплопроводности зависит от структуры материала его пористости и влажности.

Многие строительные и теплоизоляционные материалы имеют пористое строение (кирпич, бетон, асбест, шлак и др.) со значениями коэффициента теплопроводности в пределах 0,023–2,9 Вт/(м · К).

Материалы с низким значением коэффициента теплопроводности [меньше 0,25 Вт/(м · К)], обычно применяемые для тепловой изоляции, называются теплоизоляционными.

Для влажного материала коэффициент теплопроводности значительно больше, чем для сухого. Например, для сухого кирпича $\lambda = 0,35$ Вт/(м · К), а для влажного кирпича $\lambda = 1,0$ Вт/(м · К). Этот эффект может быть объяснен конвективным переносом теплоты, возникающим благодаря капиллярному движению воды внутри пористого материала.

Увеличение коэффициента теплопроводности зернистых материалов с изменением температуры можно объяснить тем, что с повышением температуры возрастает теплопроводность среды, заполняющей промежутки между зёрнами, а также увеличивается теплопередача излучением зернистого массива.

Введем понятия теплового потока ($Q = Q_{\tau}/\tau$) и плотности теплового потока ($q = Q/S$). Ограничимся одномерным случаем, когда температура изменяется вдоль только одной координаты, например x . Тогда $\text{grad}T = \partial T/\partial x$ и закон Фурье примет вид:

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (1.4)$$

Уравнение (1.4) содержит два параметра, поддающиеся непосредственному измерению различными способами: q и $\partial T/\partial x$. Это позволяет определить и значение λ для конкретных образцов и веществ:

$$\lambda = q / \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (1.5)$$

Уравнение (1.5) явилось основой для разработки метода определения коэффициента теплопроводности, который называется методом бесконечной тонкой пластины (или просто методом пластины). Его сущность заключается в следующем. Опытный образец выполняется в виде пластины, толщина которой много меньше образующих ее сторон (или диаметра в случае диска). К одной из поверхностей об-

разца от нагревателя подводится некоторое количество теплоты, а с противоположной стороны тепло отводится к холодильнику. Нагреватель и холодильник должны быть отрегулированы так, чтобы обе поверхности образца находились при неизменяющихся во времени температурах. Это обеспечивает стационарность процессу теплопередачи. Значительные линейные размеры образца обеспечивают: а) однородность температурного поля на плоских основаниях образца в областях, близких к центру симметрии; б) возможность пренебрежения тепловыми потерями через боковые поверхности образца.

Поскольку пластина является тонкой, то вдали от ее краев температурный градиент между поверхностями может рассматриваться как линейная функция (рис. 1.2).

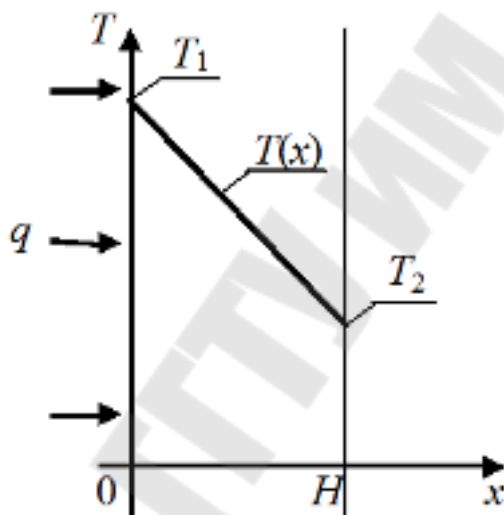


Рис. 1.2. Изменение температуры по толщине образца

Тогда $\partial T/\partial x = (T_1 - T_2)/H$, где T_1 , T_2 – температуры на плоских основаниях образца в градусах Цельсия; H – толщина пластины.

Таким образом, получаем:

$$\lambda = qH/(T_1 - T_2). \quad (1.6)$$

Описание экспериментальной установки

Эксперимент проводится на лабораторном стенде с использованием модуля, изображенного на рис. 1.3. Модуль содержит массивный текстолитовый диск 5, выполняющий роль теплоизолятора, в котором имеется цилиндрическая глухая полость.

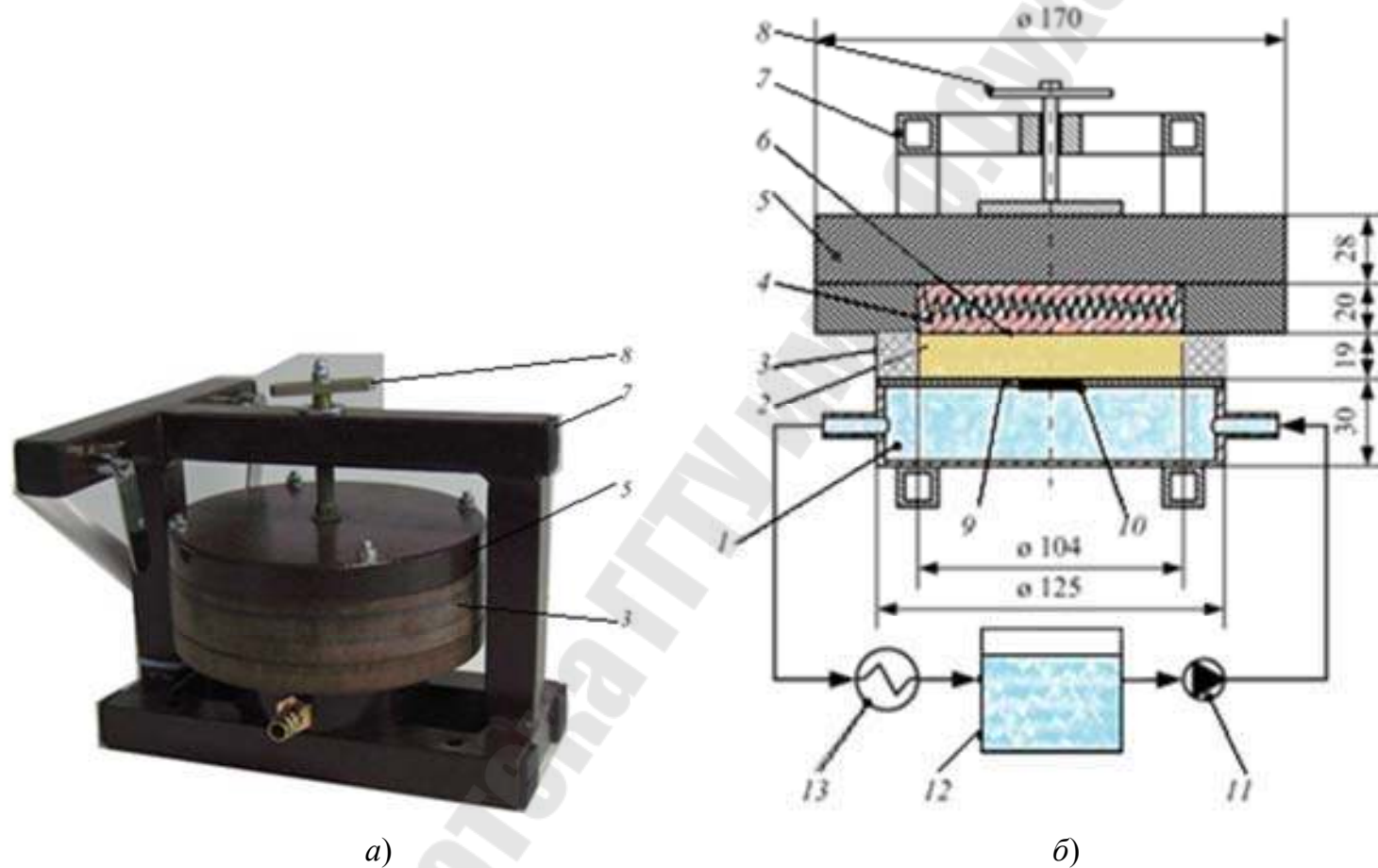


Рис. 1.3. Модуль для определения теплоемкости методом пластины (а), функциональная схема модуля (б):
 1 – водяной охладитель; 2 – исследуемый материал; 3 – теплоизоляционное кольцо; 4 – электронагреватель;
 5 – текстолитовый диск; 6, 9 – датчики температуры; 7 – опорная рама; 8 – барашек;
 10 – датчик плотности теплового потока; 11 – насос; 12 – бак холодной воды;
 13 – воздушный охладитель контура холодной воды

В ней размещен электронагреватель 4, залитый металлом с высокой теплопроводностью, что обеспечивает создание равномерного температурного поля. Между нагревателем и водяным холодильником 1 расположено теплоизоляционное кольцо 3, которое применяется при исследовании теплопроводности сыпучих материалов. При изучении теплопроводности твердых тел кольцо удаляется, а на его место устанавливается изучаемый образец в форме диска. Тепловой поток, прошедший через диск, отводится водой холодного контура.

Вся система находится на опорной раме 7, позволяющей разъединять нагреватель и холодильник вращением барашка 8, а также зажимать опытный образец между ними, чтобы свести к минимуму контактное тепловое сопротивление.

Регулирование теплового потока электронагревателя происходит ступенчато. Для измерения температуры поверхности t_1 и t_2 опытного текстолитового диска использованы датчики 6 и 9, которые установлены на наружной поверхности нагревателя и холодильника, а плотность теплового потока q фиксируется показывающим прибором по сигналу датчика теплового потока 10, установленного в середине заподлицо с наружной поверхностью холодильника.

Датчик теплового потока представляет собой гальваническую термобатарейку из нескольких сот последовательно соединенных термопар, сложенных бифилярно в спираль и залитую эпоксидным компаундом с различными добавками. Датчик имеет два вывода (по одному от каждого конца чувствительного элемента). Работа датчика основана на принципе «дополнительной стенки».

Датчик закрепляется на теплообменной поверхности исследуемого объекта, образуя дополнительную стенку. Тепловой поток, проходящий через датчик, создает в нем градиент температур и соответствующий термоэлектрический сигнал. Величина плотности теплового потока пропорциональна этому сигналу, что позволяет соответственно проградуировать прибор, измеряющий термоЭДС.

Порядок выполнения измерений

1. Установить исследуемый образец (круг из текстолита) внутрь установки и с помощью винтового механизма слегка зажать его между нагревателем и датчиком теплового потока. **ВНИМАНИЕ!** Не прилагать усилий при сжатии, чтобы не повредить датчик плотности теплового потока.

2. Убедиться в том, что переключатели установлены в положения: SA1 – «выкл», SA2 (Насос-1) – «выкл», SA3 – «центральное положение» SA4 (Насос-2) – «выкл», SA5 – «выкл», SA6 – «выкл», SA14 – min, SA15 – min, SA16 – min.

3. Включить автоматические выключатели QF1 и QF2 на панели стенда. Установить профиль индикации «L1».

4. Максимально открыть вентиль синего цвета на трубопроводе. Включить клавишный выключатель SA2 (Насос-1). Это приведет в работу циркуляционный насос охлаждающей воды. Установить вентилем расход $g_1 = 0,015-0,020$ л/с.

5. Переключателями SA14 и SA15 установить мощность электронагревателя по заданию преподавателя.

6. Дождаться наступления стационарного режима теплопередачи (значения температур и плотности теплового потока перестанут изменяться) и зафиксировать показания приборов.

7. Повторить измерения при других значениях мощности электронагревателя (по указанию преподавателя).

Обработка результатов измерений

Поскольку противоположные основания пластины находятся при разных температурах, примем за температуру пластины их среднее значение:

$$T_{\text{пл}} = 0,5(T_1 + T_2). \quad (1.7)$$

Результаты измерений и расчетов по формулам (1.6) и (1.7), а также расчета точности косвенных измерений $\Delta\lambda$ заносятся в табл. 1.1. В заключение проводится сравнение опытных результатов с литературными данными и объясняются причины полученных расхождений.

Таблица 1.1

Значения измеренных величин

Параметры	$H_{\text{ср}}$	T_1	T_2	q	$T_{\text{пл}}$	$\lambda_{\text{эксп}}$	$\Delta\lambda$	$\lambda_{\text{табл}}$
Единица измерения	м	°С	°С	Вт/м ²	°С	Вт/(м · °С)	%	Вт/(м · °С)
1								
2								
3								

Контрольные вопросы

1. Дать определение понятий: теплообмен, конвективный теплообмен, конвективная теплоотдача. Способы передачи теплоты, их особенности.
2. Механизм передачи тепла теплопроводностью в металлах, диэлектриках, в жидкостях и газах.
3. Закон Фурье, объяснить знак «минус» в математическом описании закона.
4. Дать определение понятий: стационарное/нестационарное температурное поле, градиент температуры, коэффициент теплопроводности, плотность теплового потока, изотермическая поверхность.
5. Как зависит коэффициент теплопроводности металлов, твердых, жидких и газообразных сред от давления, температуры, структуры и влажности?
6. Сущность метода тонкой пластины при определении коэффициента теплопроводности. Функциональная схема опытной установки.

Лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗМЕРИТЕЛЯ ИТЭМ-1М

Цель работы: экспериментальное определение теплопроводности твердых, механически обрабатываемых материалов: металлов, керамики, пластмасс, стекла при комнатных температурах с помощью измерителя ИТЭМ-1М.

Описание экспериментальной установки

Измеритель теплопроводности включает в себя термоблок 1 (ТБ) и измерительный блок 2 (ИБ) (рис. 2.1).

Термоблок (ТБ) состоит из блока измерительного верхнего (БИВ), блока измерительного нижнего (БИН) и механизма подъема 3. В БИН размещены тепломер и термopара. В БИВ размещены нагреватель и термopары.

Наличие плавающей подвески обеспечивает надежный контакт испытуемого образца с БИН и БИВ, между которыми он размещен.

При повороте рукоятки через зубчатые колеса передается движение на рычаг, который поднимает или опускает штангу вместе с БИВ. БИВ закрыт внешним кожухом. БИН, в котором размещены платы с электроэлементами и колодка для подключения свободных концов термопар, также закрыт кожухом.

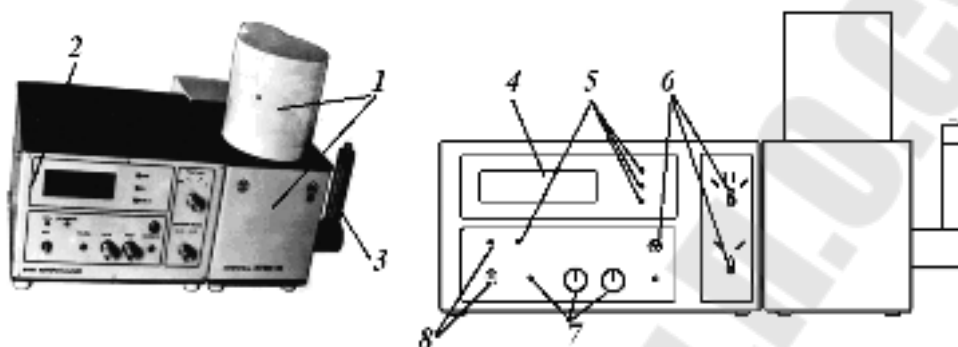


Рис. 2.1. Измеритель ИТЭМ-1М:

1 – термоблок; 2 – измерительный блок (ИБ); 3 – механизм подъема;
4 – цифровое табло; 5 – индикаторы «с 100», «мм», «Вт/(м · К)»,
«ГОТОВН»; 6 – переключатели «ДИАПАЗОН, Вт/(м · К)»,
«РОД РАБОТ», и кнопка «КАЛИБР Кт»; 7 – резисторы «УСТ. Rк»,
«УСТ. h», «УСТ. D»; 8 – тумблер и индикатор включения сети

В основу работы измерителя положен стационарный сравнительный метод измерения. На рис. 2.2 представлена тепловая модель метода измерений.

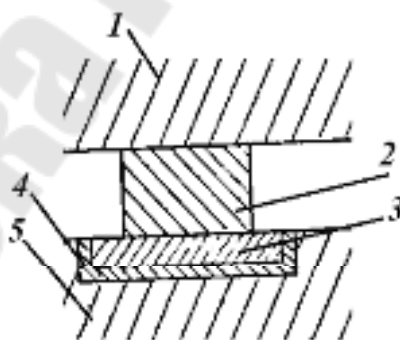


Рис. 2.2. Тепловая модель метода измерений:

1 – блок верхний (БИВ); 2 – образец испытуемый; 3 – термомер;
4 – рабочий слой термомера; 5 – блок нижний (БИН)

Образцы 2, имеющие форму диска или цилиндра, и контактирующий с ними термомер помещаются между двумя блоками 1 и 5 с одинаковой теплоемкостью. Верхний блок перегревается относительно нижнего на 5–10 К.

После установления в исследуемом образце теплового режима, близкого к стационарному, измеряются температурные перепады на образце υ_0 и на тепломере υ_T . В качестве датчиков температуры используются тепломеры. Для материалов с теплопроводностью $\lambda \leq 7$ Вт/(м · К) изменение перепада температуры на образце производится с помощью термопар, вмонтированных в нижнее ядро вблизи четырех контактных поверхностей, а при более высоких теплопроводностях исследуемых материалов измерение производится с помощью армированных термопар, размещенных в двух радиальных отверстиях образца вблизи его торцов.

Расчет теплопроводности производится по соотношению (2.1):

$$\lambda = \frac{K_T h}{F} \cdot \frac{\upsilon_T}{\upsilon_0}, \quad (2.1)$$

где K_T – тепловая проводимость тепломера, Вт/(м · К); h – высота образца, м; F – площадь образца, м²; υ_T – перепад температуры на тепломере, К; υ_0 – перепад температуры на образце, К.

Значение K_T определяется из градуировочных опытов на образцовых мерах теплопроводности.

Порядок выполнения измерений

1. Калибровка

1.1. Включите измеритель в работу тумблером СЕТЬ, при этом должна загореться световая индикация СЕТЬ.

1.2. Управление работой измерителя осуществляется с помощью органов управления, расположенных на лицевой панели блока измерительного.

1.3. Измерьте высоту и диаметр образцовой меры, изготовленной из оргстекла или сплава Вт-6.

1.4. Установите образцовую меру теплопроводности из оргстекла или сплава ВТ6.

1.5. Переведите переключатель РОД РАБОТ в положение h и резистором УСТ.h введите размер высоты образцовой меры по цифровому табло измерителя.

1.6. Переведите переключатель РОД РАБОТ в положение D и резистором УСТ.D введите размер диаметра образцовой меры по цифровому табло измерителя.

1.7. Переведите переключатель РОД РАБОТ в положение λ и после того как загорится световая индикация ГОТОВНОСТЬ, опустите верхний термоблок.

1.8. Произведите измерение значения теплопроводности образцовой меры. Если значение теплопроводности отличается от справочного при температуре измерения, то при помощи резистора УСТ.Рк произведите установку значения теплопроводности образцовой меры (органическое стекло и сплав Вт-6), которые находятся в диапазоне 0,2–7 Вт/(м · К).

1.9. Нажмите кнопку КАЛИБР.Кт. Произведите пять замеров Кт и запишите их значения.

1.10. Затем установите в термоблок новую образцовую меру из нержавеющей или низкоуглеродной стали, переключатель ДИАПАЗОН Вт/(м · К) переведите в положение 7–80 и повторите операции по п. 1.5–1.9.

1.11. Вычислите среднее арифметическое значение Кт, полученное по результатам измерений в п. 1.5–1.10, и резистором КАЛИБР.Кт при нажатой кнопке КАЛИБР.Кт установите его значение по цифровому табло измерителя.

2. Измерение теплопроводности исследуемого образца

2.1. Поднимите рукояткой БИВ и установите исследуемый образец, предварительно измерив его геометрические размеры. Переключатель ДИАПАЗОН Вт/(м · К) установите в положение, соответствующее ожидаемому значению λ .

2.2. Повторите операции по п. 1.5–1.7.

2.3. Произведите отсчет значения теплопроводности по цифровому табло измерителя.

Внимание! Испытуемый образец должен находиться строго по центру пластины тепломера, расположенной в блоке измерительном нижнем.

2.4. Произвести измерение значения теплопроводности образца 10 раз.

2.5. Вычислить среднее значение теплопроводности по формуле (2.2):

$$\bar{\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^{10} \lambda_i}{10}. \quad (2.2)$$

Контрольные вопросы

1. Определение теплового потока, плотности теплового потока единицы измерения. Объяснить знак «минус» в правой части уравнения Фурье.

2. Определение коэффициента теплопроводности; назвать, от чего зависит. Привести пример материала, обладающего высокой способностью проводить тепло.

3. Конструкция измерителя ИТЭМ–1М. Как определяется числовое значение коэффициента теплопроводности с использованием измерителя. Калибровка прибора.

Лабораторная работа № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ЦИЛИНДРОВ

Цель работы: экспериментально определить коэффициент теплопроводности сыпучего материала методом цилиндра; определить зависимость коэффициента теплопроводности от температуры.

Теоретическая часть

Изучение любого физического явления сводится к установлению зависимости между величинами, характеризующими это явление. При решении задач, связанных с нахождением температурного поля, необходимо иметь дифференциальное уравнение теплопроводности.

В основу вывода дифференциального уравнения теплопроводности положен закон сохранения энергии: количество тепла dQ , введенное в элементарный объем dv извне за время dt вследствие теплопроводности, а также от внутренних источников теплоты, равно изменению внутренней энергии вещества, содержащегося в этом объеме:

$$dQ_1 + dQ_2 = dQ, \quad (3.1)$$

где dQ_1 – количество тепла, введенное в элементарный объем dv путем теплопроводности за время dt ; dQ_2 – количество тепла, которое за время dt выделилось в элементарном объеме за счет внутренних источников тепла; dQ – изменение внутренней энергии вещества, содержащегося в элементарном объеме dv за время dt .

Тогда

$$-\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) dv d\tau + q_v dv d\tau = c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} dv d\tau. \quad (3.2)$$

Выразим частную производную от температуры по времени:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = -\frac{1}{c\rho} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) + \frac{q_v}{c\rho}. \quad (3.3)$$

Плотность теплового потока в соответствии с законом Фурье равна $q = -\lambda \cdot \text{grad}t$. Проекции вектора плотности теплового потока на соответствующие координатные оси определим как $q_x = -\lambda \partial t / \partial x$, $q_y = -\lambda \partial t / \partial y$ и $q_z = -\lambda \partial t / \partial z$. Подставим эти выражения в формулу (3.3) и получим:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{c\rho}. \quad (3.4)$$

Если обозначить через оператор Лапласа $\nabla^2 t = \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}$ и $a = \lambda / (c\rho)$ – коэффициент температуропроводности, то дифференциальное уравнение (3.4) можно записать как

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \frac{q_v}{c\rho}. \quad (3.5)$$

Коэффициент температуропроводности характеризует скорость изменения температуры в нестационарных процессах, является мерой теплоинерционных свойств тела и имеет размерность м²/с. Скорость изменения температуры будет тем выше, чем больше коэффициент температуропроводности, т. е. при прочих равных условиях выравнивание температуры будет происходить быстрее. Также коэффициент температуропроводности зависит от природы вещества: для металлов больше, чем для жидкостей и газов.

В цилиндрической системе координат выражение $\nabla^2 t$ имеет вид:

$$\nabla^2 t = \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}, \quad (3.6)$$

где r – радиус-вектор; φ – полярный угол; z – аппликата.

Рассмотрим стационарный процесс теплопроводности через слой песка, находящийся между двумя цилиндрическими поверхностями (трубами), т. е. $\partial t / \partial \tau = 0$. В трубу с меньшим диаметром $d_{\text{вн}} = 2r_{\text{вн}}$ вмонтирован электронагреватель, а труба с наружным диаметром $d_{\text{н}} = 2r_{\text{н}}$ является внешней оболочкой, придающей песку форму цилиндрической поверхности.

Тепло передается от трубы с диаметром $d_{\text{вн}}$ через слой песка к трубе с диаметром $d_{\text{н}}$ только теплопроводностью, т. е. отсутствует дополнительный подвод тепла за счет внутренних источников, тогда $q_v = 0$.

Ось Q_z совмещена с осью труб. При заданных условиях температура изменяется только в радиальном направлении и температурное поле будет одномерным. Поэтому

$$\frac{\partial t}{\partial z} = 0 \text{ и } \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0. \quad (3.7)$$

Кроме того, так как температуры на наружной и внутренней поверхностях труб неизменны, изотермические поверхности являются цилиндрическими, имеющими с трубой общую ось. Тогда температура не должна изменяться также вдоль φ , т. е.

$$\frac{\partial t}{\partial \varphi} = 0 \text{ и } \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} = 0. \quad (3.8)$$

С учетом (3.7) и (3.8) уравнение (3.6) примет вид:

$$\nabla^2 t = \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r}. \quad (3.9)$$

С учетом вышеизложенного уравнение (3.5) для рассматриваемого случая примет вид:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} = 0. \quad (3.10)$$

Граничные условия: при $r = r_{\text{н}}$ $t = t_{\text{н}}$; при $r = r_{\text{вн}}$ $t = t_{\text{вн}}$.

Введем новую переменную $u = dt/dr$, тогда

$$\frac{d^2 t}{dr^2} = \frac{du}{dr}, \quad \frac{1}{r} \frac{dt}{dr} = \frac{u}{r}. \quad (3.11)$$

Подставляя (3.11) в (3.10), получаем (3.12):

$$\frac{du}{dr} + \frac{u}{r} = 0. \quad (3.12)$$

Интегрируя выражение (3.12), получаем (3.13):

$$\ln u + \ln r = \ln C_1. \quad (3.13)$$

Потенцируя выражение (3.13) и переходя к первоначальным переменным, получаем (3.14):

$$dt = C_1 \frac{dr}{r}. \quad (3.14)$$

После интегрирования выражения (3.14) получим (3.15):

$$t = C_1 \ln r + C_2. \quad (3.15)$$

Постоянные C_1 и C_2 можно определить, если в уравнение (3.15) подставить граничные условия:

$$\text{при } r = r_{\text{н}}, t = t_{\text{вн}}, \text{ отсюда } t_{\text{вн}} = C_1 \ln r_{\text{н}} + C_2; \quad (3.16)$$

$$\text{при } r = r_{\text{вн}}, t = t_{\text{н}}, \text{ отсюда } t_{\text{н}} = C_1 \ln r_{\text{вн}} + C_2. \quad (3.17)$$

Решение уравнений (3.16) и (3.17) относительно C_1 и C_2 дает (3.18):

$$C_1 = \frac{t_{\text{вн}} - t_{\text{н}}}{\ln \frac{r_{\text{н}}}{r_{\text{вн}}}}; \quad C_2 = t_{\text{вн}} - (t_{\text{вн}} - t_{\text{н}}) \frac{\ln r_{\text{н}}}{\ln \frac{r_{\text{н}}}{r_{\text{вн}}}}. \quad (3.18)$$

Подставив значения C_1 и C_2 в уравнение (3.15), получим (3.19):

$$t = t_{\text{вн}} - (t_{\text{вн}} - t_{\text{н}}) \frac{\ln \frac{r}{r_{\text{вн}}}}{\ln \frac{r_{\text{н}}}{r_{\text{вн}}}}. \quad (3.19)$$

Для нахождения количества теплоты, проходящего через цилиндрическую поверхность величиной F в единицу времени, можно воспользоваться законом Фурье:

$$Q = -\lambda \frac{dt}{dr} F. \quad (3.20)$$

Подставляя в уравнение (3.20) значение градиента температуры согласно уравнению (3.14), получаем (учитывая, что $F = 2\pi rl$):

$$Q = \frac{2\pi\lambda l(t_{\text{вн}} - t_{\text{н}})}{\ln \frac{d_{\text{н}}}{d_{\text{вн}}}}. \quad (3.21)$$

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рис. 3.1) представляет собой конструкцию типа «труба в трубе» длиной $l = 784$ мм. Торцы конструкции закрыты текстолитовыми заглушками 11, что предотвращает теплопотери через них. Между трубами засыпан песок, теплопроводность которого определяется. Ориентировочно коэффициент теплопроводности песка изменяется в диапазоне $0,35\text{--}0,814$ Вт/(м · К), увеличиваясь с повышением влажности. В трубу 2 меньшего диаметра $d_{\text{вн}} = 12,5$ мм вмонтирован электронагреватель 3.

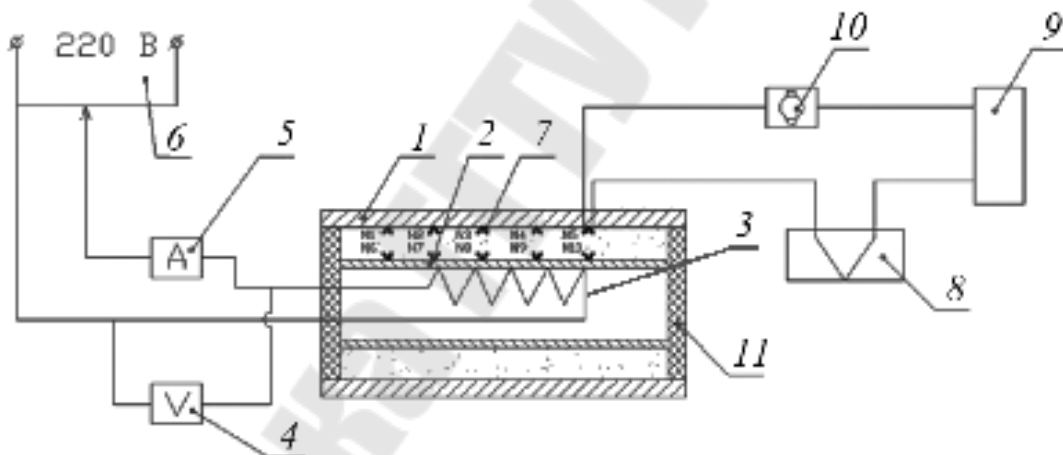


Рис. 3.1. Схема экспериментальной установки:

- 1, 2 – наружный и внутренний цилиндры; 3 – электронагреватель;
 4 – вольтметр; 5 – амперметр; 6 – регулятор напряжения;
 7, 8 – термопары; 9 – потенциометр; 10 – переключатель;
 11 – заглушки

Для изменения тепловой мощности нагревателя установлен регулятор напряжения 6. Используя показания вольтметра 4 и амперметра 5, определяют тепловую мощность нагревателя.

Труба 1 с диаметром $d_{\text{н}} = 48$ мм является внешней оболочкой, придающей песчаной засыпке форму цилиндрической поверхности.

С помощью термопар 7 и 8, установленных в пяти точках на наружной поверхности трубы 2 и в пяти точках, установленных на внутренней поверхности трубы 1, определяется температура песка внутри засыпки и снаружи. С помощью потенциометра 9 и переключателя 10 измеряют термоЭДС в конкретных точках, а затем, используя градуировочный график, определяют температуру в этих точках.

Порядок выполнения измерений

1. Включить электронагреватель 3 и прогреть установку в течение 15–20 мин при $U_1 = 50–70$ В.

2. Снять все показания приборов (амперметра 5, вольтметра 4, потенциометра 9) и занести в табл. 3.1 и установить новый режим U_2 .

3. Через 5–10 мин повторять замеры температуры до получения нового установившегося (стационарного) режима. Показания потенциометра заносятся в табл. 3.1.

4. После установления стационарного режима произвести замеры, изменить силу тока, питающего электронагреватель, и произвести измерения, аналогичные в п. 2 и 3.

При определении температур следует пользоваться градуировочным графиком, так как потенциометр дает показания температур в делениях шкалы, которые надо перевести в милливольты (полная шкала – 150 делений соответствует 45 мВ).

Обработка результатов измерений

1. Тепловой поток, проходящий от внутренней к внешней поверхности слоя песка, Вт:

$$Q = IU. \quad (3.22)$$

2. Коэффициент теплопроводности исследуемого материала определить, используя выражение (3.21).

3. Построить графическую зависимость коэффициента теплопроводности от средней температуры исследуемого материала $\lambda = f(\bar{t})$, $\bar{t} = (t_{\text{вн}} + t_{\text{н}})/2$.

Значения измеренных величин

№ п/п	Показания прибора	Показания термопар										Средняя температура		I, А	U, В	λ , Вт/м·К
		наружные					внутренние					$t_{вн}$, °С	$t_{н}$, °С			
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5					
1	в делениях шкалы															
	в мВ															
	в °С															
2	в делениях шкалы															
	в мВ															
	в °С															
3	в делениях шкалы															
	в мВ															
	в °С															

Контрольные вопросы

1. Закон сохранения энергии.
2. Дифференциальное уравнение теплопроводности. Коэффициент температуропроводности.
3. Как определить количество теплоты, проходящее через цилиндрическую поверхность?
4. Как определить градиент температуры для цилиндрической изотермической поверхности?
5. Как экспериментально определить теплопроводность сыпучих материалов? Как повышение влажности материала повлияет на его способность проводить тепло?

Лабораторная работа № 4

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ
НА ИЗМЕРИТЕЛЕ ИТ- λ -400

Цель работы: экспериментальное определение теплопроводности твердых, механически обрабатываемых материалов в режиме монотонного нагрева с помощью измерителя ИТ- λ -400.

Теоретическая часть

Измеритель ИТ-λ-400 предназначен для массовых исследований теплофизических свойств, в его основу положен режим монотонного нагрева (метод динамического калориметра), позволяющий из одного эксперимента получить сразу температурную зависимость изучаемого параметра и обеспечивающий высокую производительность.

Тепловая схема метода динамического калориметра представлена на рис. 4.1.

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

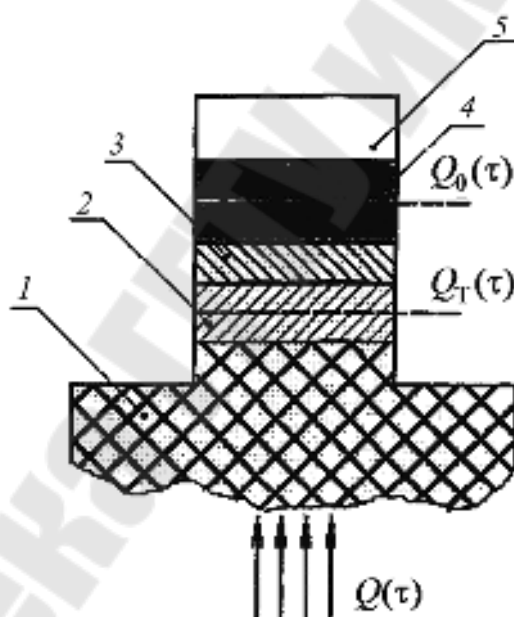


Рис. 4.1. Тепловая схема метода:

1 – основание; 2 – пластина; 3 – пластина контактная;

4 – испытуемый образец; 5 – стержень

Тепловой поток $Q_T(\tau)$, 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 близкими скоростями, а для тепловых потоков $Q_O(\tau)$ и $Q_T(\tau)$ справедливы формулы (4.1) и (4.2):

$$Q_O(\tau) = \frac{v_O S}{P} = \left(\frac{1}{2} C_O + C_C \right) b, \quad (4.1)$$

где $Q_O(\tau)$ – тепловой поток, проходящий через образец и поглощаемый стержнем, Вт; v_O – перепад температуры на образце, К; S – площадь поперечного сечения образца, m^2 ; P – тепловое сопротивление между стержнем и контактной пластиной, $(m^2 \cdot K)/Вт$; C_O – полная теплоемкость образца, Дж/К; C_C – полная теплоемкость стержня, Дж/К; b – скорость разогрева измерительной ячейки, К/с.

$$Q_T(\tau) = K_T^* v_T = \left(\frac{1}{2} C_T + C_{II} + C_O + C_C \right) b, \quad (4.2)$$

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_{II} – полная теплоемкость пластины контактной 3, Дж/К.

Тепловое сопротивление между стержнем и контактной пластиной определяется по формуле (4.3):

$$P = P_O + P_K, \quad (4.3)$$

где P_O – тепловое сопротивление образца, $(m^2 \cdot K)/Вт$; P_K – поправка, учитывающая тепловое сопротивление контакта, неидентичность и тепловое сопротивление заделки термопар, $(m^2 \cdot K)/Вт$.

Тепловое сопротивление образца определяется по формуле (4.4):

$$P_O = \frac{h}{\lambda}, \quad (4.4)$$

где h – высота образца, м; λ – теплопроводность образца, Вт/(м · К).

На основании формул (4.1)–(4.4) получены рабочие расчетные формулы для теплового сопротивления образца и его теплопроводности (4.5)–(4.7).

$$P_0 = \frac{\nu_0 S(1 + \sigma_c)}{\nu_T K_T} - P_K, \quad (4.5)$$

где $\sigma_c = \frac{C_0}{2(C_0 + C_C)}$ – поправка, учитывающая теплоемкость образца, влияние σ_c обычно не превышает 5–10 % и может оцениваться по ориентировочным данным теплоемкости образца; $C_0 = C_0(t)m_0$ – полная теплоемкость образца, Дж/К; $C_0(t)$ – ориентировочное значение удельной теплоемкости образца, Дж/(кг · К); m_0 – масса образца, кг; $C_C = C_M(t)m_C$ – полная теплоемкость стержня, Дж/К; $C_M(t)$ – удельная теплоемкость меди, Дж/(кг · К); m_C – масса стержня, кг.

Значение тепловой проводимости пластины определяется по формуле (4.6):

$$K_T = K_T^* \frac{C_C}{(0,5C_T + C_{\Pi}) \approx C_C}. \quad (4.6)$$

Теплопроводность испытуемого образца определяется по формуле (4.7) и относится к средней температуре образца \bar{t} .

$$\lambda = h/P_0. \quad (4.7)$$

Средняя температура образца определяется по формуле (4.8):

$$\bar{t} = t_C + 0,5A_t n_0, \quad (4.8)$$

где t_C – температура, при которой проводилось измерение теплопроводности, °С; A_t – чувствительность термопары хромель–алюмель, К/мВ; n_0 – перепад температуры на образце, мВ.

Параметры K_T и P_K не зависят от свойств испытуемого образца, являются «постоянными» измерителя. Значения P_K 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.

Постоянные измерителя, полученные при градуировке, и данные, необходимые в эксплуатации, представлены в паспорте измерителя.

Описание экспериментальной установки

На рис. 4.2 представлен внешний вид измерителя ИТ-λ-400. В состав измерителя входит: микровольтнаноамперметр 1, блок питания и регулирования 2, блок измерительный 3, верхняя часть измерительной ячейки 4.

Блок питания и регулирования 2 обеспечивает нагрев ядра измерительной ячейки 4 со средней скоростью 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. Для определения теплопроводности в эксперименте в процессе непрерывного разогрева на фиксированных уровнях температуры с помощью прибора Ф136 (в микровольтах) 1 измеряется перепад температур на образце U_O и пластине тепломера U_T .

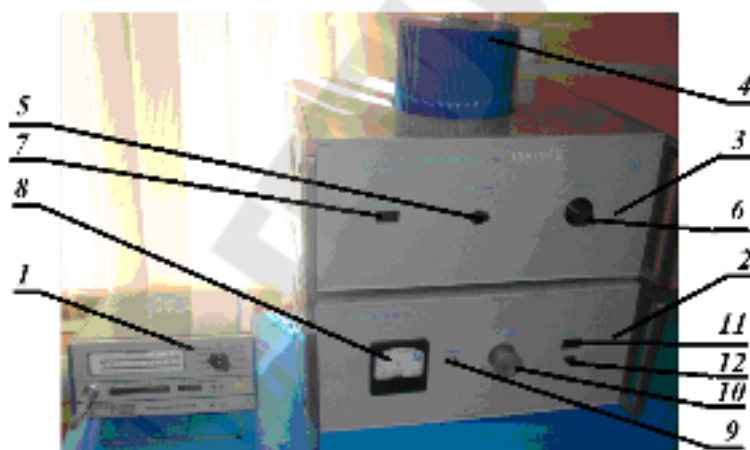


Рис. 4.2. Внешний вид измерителя ИТ-λ-400:

- 1 – микровольтнаноамперметр Ф136; 2 – блок питания и регулирования; 3 – блок измерительный; 4 – верхняя часть измерительной ячейки; 5 – температурный переключатель с положениями « t_C », « P_O », « P_T », «УСТ 0»; 6 – переключатель «ТЕМПЕРАТУРА»; 7 – индикатор «РАБОТА РЕГУЛЯТОРА»; 8 – вольтметр; 9 – кнопка «НАГРЕВ»; 10 – регулятор напряжения; 11 – индикатор «СЕТЬ»; 12 – кнопка «СЕТЬ»

Важнейшей частью измерительного блока является ячейка измерительная (рис. 4.3).

Ячейка состоит из корпуса 9, разъемной теплозащитной оболочки 10 и металлического ядра (детали 1, 2, 3, 4, 11, 13, 14). Корпус 9

состоит из двух частей, снабжен ребрами для интенсификации теплообмена на его поверхности (на рис 4.3 не показаны). Нижняя часть корпуса закреплена на верхней горизонтальной плате измерительного блока, верхняя часть – на подъемно-воротном штанговом механизме.

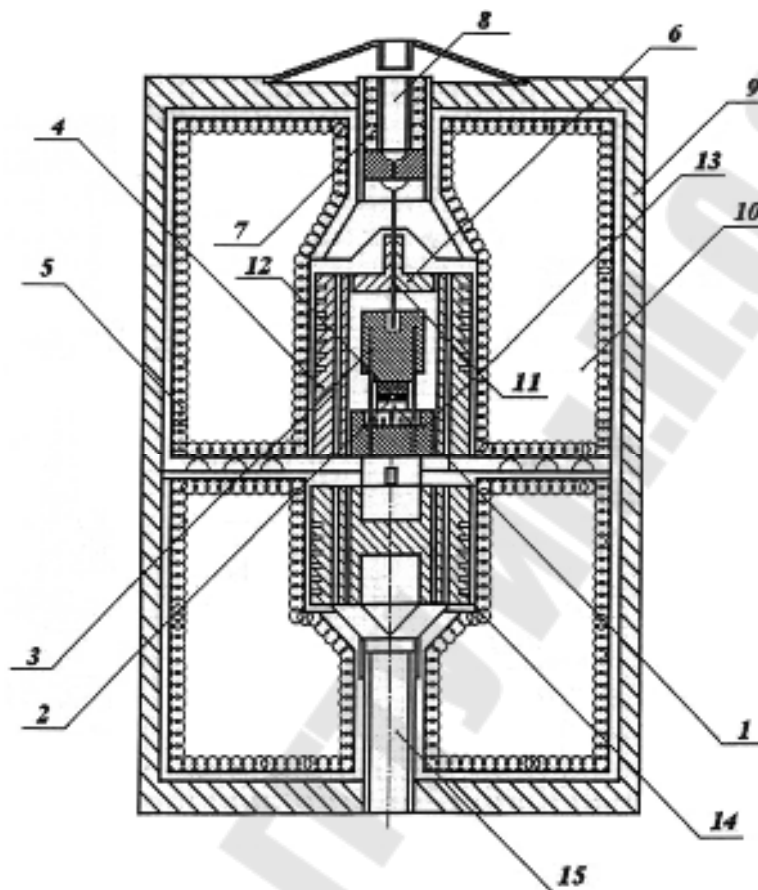


Рис. 4.3. Измерительная ячейка:

- 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

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.

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. 4.3 не показаны) используются для вывода концов термопар и нагревателей. Охранный колпак 4 с помощью аналогичной детали крепится к верхней части корпуса. Для температурных изменений используются 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 стрержнем 11, прижимом 6 и пружиной 7. Тепломер смонтирован в медном основании 13.

Рабочим слоем тепломера является пластина 1 из нержавеющей стали.

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 алюминия. Для установки термостолбиков 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.

Порядок выполнения измерений

1. Подключить блок питания и регулирования и прибор Ф136 к сети 220 В, 50 Гц.

2. Установить переключатель «ИЗМЕРЕНИЕ» в положение «УСТ 0»; переключатель «ТЕМПЕРАТУРА» в положение «25 °С».

3. Взвесить образец, измерить его высоту и диаметр. Занести полученные данные об образце в табл. 4.2.

4. Поднять верхнюю половину корпуса измерительной ячейки. Протереть бензином и нанести тонкий слой смазки ПФМС-4 на контактные поверхности стержня, образца, контактной пластины тепломера.

5. Образец установить на контактную пластину тепломера, стержень – на иглы термопары.

6. Опустите верхнюю половину корпуса измерительной ячейки. Включите блок питания и регулирования кнопкой «СЕТЬ». Установите по вольтметру начальное напряжение 48 В при работе от 25 °С и 20 В при работе от –100 °С.

7. Установите переключатель «ИЗМЕРЕНИЕ» в положение « t_C ».

8. Проведите охлаждение измерительной ячейки. Следите по прибору Ф136 за температурой ячейки, последовательно (от +25 до –125 °С) проводя переключение рукояткой «ТЕМПЕРАТУРА». Снимите бачок с колпака измерительного блока через 2–3 мин после достижения температуры –125 °С.

9. Включите кнопкой «НАГРЕВ» основной нагреватель.

10. Снимите показания прибора Ф136 P_O и P_T , при достижении каждой из температур, указанных в табл. 4.2 (температура стержня достигает ожидаемого значения при прохождении светового указателя прибора Ф136 через нулевую отметку), проводя переключения рукояткой «ИЗМЕРЕНИЕ». Занесите значения P_O и P_T в табл. 4.2 и переведите переключатель «ИЗМЕРЕНИЕ» в положение t_C .

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

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

13. Заарретируйте прибор Ф136.

14. Проведите охлаждение измерительной ячейки до комнатной температуры.

15. Выключите блок питания и регулирования.

Таблица 4.2

Основные параметры образца и результаты эксперимента

Высота $h =$ м, диаметр $d =$ м, масса $m =$ кг Площадь поперечного сечения образца $S =$ м ²										
$t_C,$ °С	$P_O,$ дел	$P_T,$ дел	$K_T,$ Вт/К	$P_K,$ (К · м)/Вт	$P_O,$ (К · м)/Вт	$C_C,$ Дж/К	σ_c	A_t	$\bar{t},$ °С	$\lambda,$ Вт/м · К
–100										
–50										
0										
50										
100										
150										
200										

Обработка результатов измерений

Определите поправку на теплоемкость образца σ_c и по формуле (4.5) определите тепловое сопротивление образца P_0 .

Рассчитайте теплопроводность испытуемого образца λ по формуле (4.7).

Определите температуру отнесения измерительного значения теплопроводности \bar{t} по формуле (4.8).

Контрольные вопросы

1. Назначение и тепловая схема измерителя ИТ- λ -400.
2. Как определить величину теплового потока, проходящего через образец? Как определить величину коэффициента теплопроводности, определив тепловое сопротивление образца?
3. Состав измерителя ИТ- λ -400. Как можно изменить скорость разогрева образца?
4. Конструкция и назначение измерительной ячейки. Зачем корпус измерительной ячейки снабжается ребрами?
5. Методика проведения эксперимента. Обработка результатов измерений.

Лабораторная работа № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА ТЕЛ РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ

Цель работы: освоить методику расчета процессов нестационарной теплопроводности в телах различной формы, определить коэффициент теплоотдачи и построить приближенное распределение температуры по сечению неограниченной пластины, определить температуры на поверхности и в центре цилиндра конечной длины, сравнить полученные значения с экспериментальными данными.

Теоретическая часть

Нестационарные процессы теплопроводности встречаются при охлаждении металлических заготовок, прокаливании твердых тел, в производстве стекла, обжиге кирпича и т. п.

Процессы нагревания (охлаждения) твердых тел описываются дифференциальным уравнением теплопроводности Фурье (5.1) и граничными условиями (5.2):

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right); \quad (5.1)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial n} = -\frac{\alpha}{\lambda} (T_{\text{П}} - T_{\text{С}}); \\ T_{\tau=0} = f(x, y, z), \end{cases} \quad (5.2)$$

где T – температура в определенный момент времени в данной точке тела, К; τ – время, с; a – коэффициент температуропроводности, м²/с; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² · К); $T_{\text{П}}$, $T_{\text{С}}$ – температура поверхности тела и окружающей среды, К.

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}, \quad (5.3)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К); c – удельная теплоемкость, Дж/(кг · К); ρ – плотность, кг/м³.

Из уравнения (5.1) видно, что скорость изменения температуры $\frac{\partial T}{\partial \tau}$ в любой точке тела пропорциональна коэффициенту температуропроводности a , который является мерой теплоинерционных свойств тела. Величина коэффициента температуропроводности определяется природой вещества и его температурой. Причем согласно (5.3) с увеличением теплопроводности величина a возрастает, а с увеличением плотности или теплоемкости – уменьшается. В результате жидкости, например, характеризуются большей теплоинерционностью, т. е. малыми значениями величины a , а металлы и газы – большими.

Чтобы получить расчетную формулу для тела определенной формы, нужно найти решение дифференциального уравнения теплопроводности с учетом условий однозначности. Эти условия содержат сведения о геометрической форме и размерах тела, его теплофизических свойствах, начальном распределении температуры, а также от условиях теплообмена на границах тела. Однако в общем случае нестационарного режима и трехмерного температурного поля дифференциальное уравнение теплопроводности (5.1) не может быть решено. Имеются точные решения лишь для тел простейшей формы: пластины, цилиндра, шара, т. е. для одномерного температурного поля.

Теория обработки эксперимента – теория подобия – позволяет из дифференциального уравнения теплопроводности и условий однозначности получить зависимость вида

$$\theta = f\left(\text{Bi}, \text{Fo}, \frac{x}{x_1}\right), \quad (5.4)$$

где θ – безразмерная температура; Bi – число Био; Fo – число Фурье; $\frac{x}{x_1}$ – безразмерная координата.

В формуле (5.4) безразмерная температура:

а) при нагревании тела: $\theta = \frac{T - T_0}{T_C - T_0}; \quad (5.5)$

б) при охлаждении тела: $\theta = \frac{T_0 - T}{T_0 - T_C}, \quad (5.6)$

где T – искомая температура, К; T_0 – начальная температура тела, К; T_C – температура окружающей среды, К.

Число Био представляет собой отношение внутреннего термического сопротивления теплопроводности к внешнему термическому сопротивлению теплоотдачи, характеризует относительную интенсивность теплообмена и представляет безразмерный комплекс вида

$$\text{Bi} = \frac{\alpha}{\lambda} x_1, \quad (5.7)$$

где x_1 – характерный размер, м.

В условиях симметричного нагрева в качестве характерного размера выбирается половина толщины пластины, а для цилиндра и шара – радиус.

Число Фурье характеризует связь между скоростью изменения температурного поля, физическими свойствами и размерами тела и представляет собой безразмерное время. Оно рассчитывается по формуле

$$\text{Fo} = \frac{a\tau}{x_1^2}. \quad (5.8)$$

С целью упрощения решения задач нагревания и охлаждения тел зависимость (5.6) представляют в виде специальных графиков. Они имеются для неограниченной пластины, цилиндра бесконечной длины и т. п.

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рис. 5.1) состоит из муфельной печи 1 с автоматическим регулятором температуры, двух образцов – пластины 2 и цилиндра 3 с зачеканенными хромель-алюмелевыми термопарами 4. Причем термопары фиксируют температуру в середине и на поверхности пластины, по оси цилиндра на расстоянии 30 мм от торцов и на поверхности цилиндра посередине его длины.

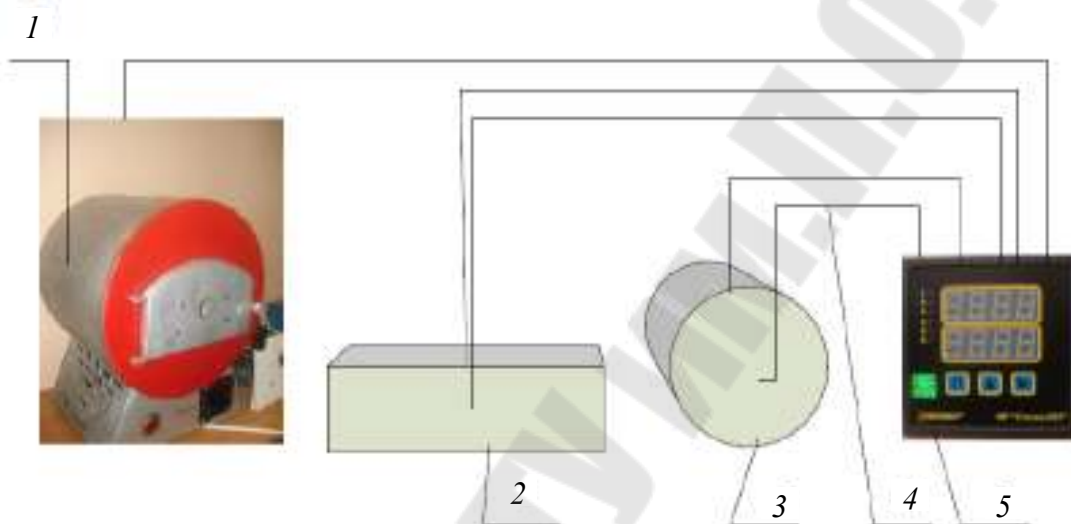


Рис. 5.1. Схема экспериментальной установки:

- 1 – муфельная печь; 2 – стальная пластина;
- 3 – медный цилиндр; 4 – хромель-алюмелевые термопары;
- 5 – измеритель-регулятор ИР «Сосна-002»

Термопары подключены к измерителю-регулятору ИР «Сосна-002» 5. Измерение температуры внутри печи проводят с помощью термопары, которая подключена к измерителю-регулятору ИР «Сосна-002» 5.

Размеры пластины – $100 \times 100 \times 10$ мм, а цилиндра – диаметр 50 мм и длина 60 мм. Пластина, толщина которой в десять раз меньше двух других размеров, рассматривается как неограниченное тело. Диаметр цилиндра сопоставим с его длиной, поэтому второй образец считаем цилиндром конечной длины. Пластина выполнена из стали, а цилиндр – из меди.

Порядок выполнения измерений

1. За 30 мин до начала проведения эксперимента муфельную печь 1 и измеритель – регулятор ИР «Сосна-002» 5 включить в электрическую сеть 220 В. С помощью автоматического регулятора муфельной печи установить температуру в печи порядка 420–450 К (150–180 °С). Контроль за температурой в печи осуществлять с помощью ИР «Сосна-002» 5. По достижении заданной температуры в печь помещают стальную пластину и начинают отсчет времени.

2. Через 3 мин фиксируют температуру в середине пластины и на ее поверхности при помощи ИР «Сосна-002» 5.

3. Через 9 мин аналогично п. 2 определяют температуру на поверхности и в середине пластины.

4. Пластины вынимают из печи; результаты эксперимента заносят в табл. 5.1.

5. В печь помещают медный цилиндр и проводят измерения температуры в центральной точке по его оси и на поверхности аналогично п. 2–4.

6. По окончании эксперимента муфельную печь и ИР «Сосна-002» 5 выключают.

Обработка результатов измерений

1. Необходимые для расчета теплофизические параметры образцов следует взять из справочной литературы и внести в табл. 5.2.

2. Результаты экспериментов и последующих расчетов заносятся в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Результаты эксперимента и расчетов

Форма образца	№ п/п	τ , с	T_0 , К	T_C , К	T_{II} , К	T_{III} , К	$\frac{x}{x_1} = 0$				$\frac{x}{x_1} = 1$					
							$\frac{\vartheta_{II}}{\vartheta_C}$	Fo	Bi	α	$\frac{\vartheta_{II}}{\vartheta_C}$	Fo	Bi	σ		
Пластина	1															
	2															
Цилиндр	1															
	2															

Теплофизические параметры образцов

Форма и материал образца	Свойства образца			
	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/м·К	Удельная теплоемкость c , Дж/кг·К	Плотность ρ , кг/м ³	Коэффициент температуропроводности a , м ² /с
Пластина (сталь)				
Цилиндр (медь)				

Неограниченная пластина

1. Для указанных моментов времени ($\tau_1 = 3$ мин и $\tau_2 = 9$ мин) рассчитываем величину безразмерной температуры в центре пластины по формуле

$$\frac{\vartheta_{\text{Ц}}}{\vartheta_{\text{С}}} = \frac{T_{\text{Ц}} - T_0}{T_{\text{С}} - T_0}, \quad (5.9)$$

где $T_{\text{Ц}}$ – температура в середине пластины, К; T_0 – начальная температура пластины, К; $T_{\text{С}}$ – температура среды в печи, К.

2. Число Фурье для $\tau_1 = 3$ мин и $\tau_2 = 9$ мин рассчитывают по формуле (5.8). За характерный размер принимается величина, равная половине толщины пластины.

3. По полученным значениям $\frac{\vartheta_{\text{Ц}}}{\vartheta_{\text{С}}}$ и Fo с помощью графика для относительной избыточной температуры в середине пластины находим число Bi (Био). Результаты записываем в табл. 5.1.

4. Коэффициент теплоотдачи определяется, исходя из формулы (5.7). Порядок расчета безразмерной температуры на поверхности пластины $\frac{\vartheta_{\text{П}}}{\vartheta_{\text{С}}}$ и числа Фурье Fo аналогичен п. 1–4.

5. В этом случае в формуле (5.9) $T_{\text{Ц}}$ заменяют на $T_{\text{П}}$, а число Био находят по графику для определения относительной избыточной температуры на поверхности пластины.

6. По экспериментальным данным в определенном масштабе на миллиметровой бумаге строят приближенное температурное поле пластины (рис. 5.2) для момента времени $\tau_1 = 3$ мин. С этой целью

изображают пластину в разрезе, находят расстояние λ/α от поверхности пластины до направляющих точек O_1 и O_2 , лежащих на уровне температуры среды в печи T_C . Расстояния будут одинаковыми вследствие симметричного нагрева пластины. Откладывают величины T_{Π} на поверхности пластины и T_{Π} по оси для данного момента времени. Соединяют T_{Π} и направляющие точки O_1 и O_2 .

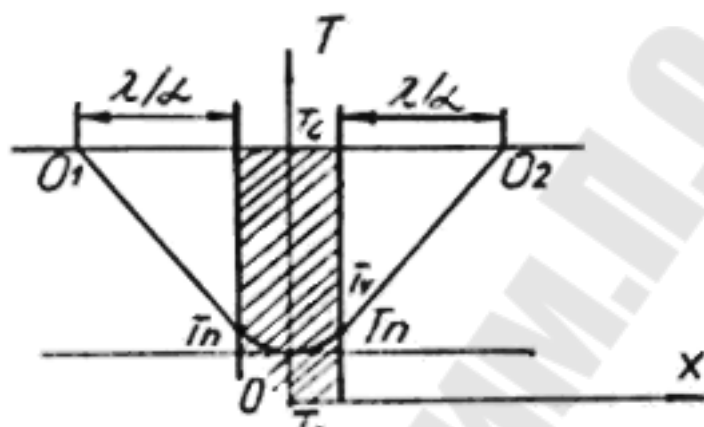


Рис. 5.2. Приближенное температурное поле пластины

Цилиндр конечных размеров

Необходимо рассчитать температуры по оси и на поверхности цилиндра в центральной его части (рис. 5.3) для момента времени $\tau_2 = 9$ мин.

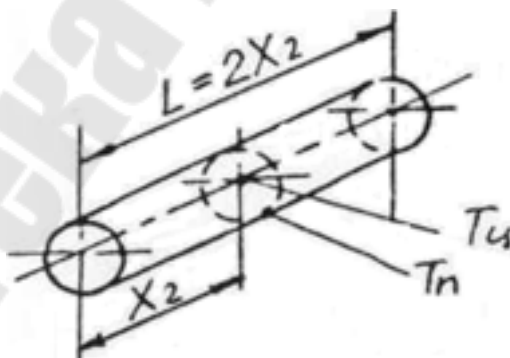


Рис. 5.3. Исходные данные для расчета температур цилиндра

Цилиндр конечных размеров можно рассматривать как тело, образованное пересечением взаимно перпендикулярных бесконечно длинного цилиндра диаметром d и неограниченной пластины, толщина которой равна конечной длине цилиндра $L = 2x_2$.

Относительную избыточную температуру $\left[\frac{(T_C - T_{Ц})}{(T_C - T_0)} \right]_{\text{кон.ц}}$ цент-

тральной точки на оси цилиндра находим в виде произведения относительных избыточных температур этой точки, полученных для бесконечно длинного цилиндра и неограниченной пластины, т. е.

$$\left[\frac{(T_C - T_{Ц})}{(T_C - T_0)} \right]_{\text{кон.ц}} = \left[\frac{(T_C - T_{Ц})}{(T_C - T_0)} \right]_{\text{цил}} \times \left[\frac{(T_C - T_{Ц})}{(T_C - T_0)} \right]_{\text{пл}}. \quad (5.10)$$

Для соответствующей точки на поверхности короткого цилиндра будем иметь:

$$\left[\frac{(T_C - T_{П})}{(T_C - T_0)} \right]_{\text{кон.ц}} = \left[\frac{(T_C - T_{П})}{(T_C - T_0)} \right]_{\text{цил}} \times \left[\frac{(T_C - T_{П})}{(T_C - T_0)} \right]_{\text{пл}}. \quad (5.11)$$

Принимая во внимание, что $\frac{T_C - T_{Ц}}{T_C - T_0} = 1 - \theta_{Ц}$ и $\frac{T_C - T_{П}}{T_C - T_0} = 1 - \theta_{П}$ (формула (5.12)), порядок расчета температур $T_{Ц}$ и $T_{П}$ будет следующим:

1. По имеющимся данным (в табл. 5.1 и 5.2) определяют значения чисел Bi и Fo для центральной точки на оси цилиндра бесконечной длины. При этом используют величину коэффициента теплоотдачи α , полученную при нагревании пластины, а за характерный размер принимают величину $d/2$. Затем по графику для определения относительной избыточной температуры в центре цилиндра находят $\theta_{Ц}$.

2. Аналогично определяют величины Bi , Fo и $\theta_{П}$ для поверхности бесконечного цилиндра. Для нахождения $\theta_{П}$ использовать графики для определения относительной избыточной температуры на поверхности цилиндра.

3. Воспользовавшись выражением (5.12), определяют значения $\left(\frac{T_C - T_{Ц}}{T_C - T_0} \right)_{\text{цил}}$ и $\left(\frac{T_C - T_{П}}{T_C - T_0} \right)_{\text{цил}}$.

4. Аналогично п. 1–3 находим относительные избыточные температуры для медной неограниченной пластины, характерным размером которой в этом случае будет x_2 , равный половине толщины пластины. Для расчета используют графики для определения относительной избыточной температуры в середине и на поверхности пластины.

5. Полученные из соотношений (5.12) значения относительных избыточных температур для бесконечного длинного цилиндра и неограниченной пластины подставляются в уравнения (5.10) и (5.11), из которых находим температуры в центре $T_{Ц}$ и на поверхности $T_{П}$ цилиндра конечных размеров. Сравнить значения температур $T_{Ц}$ и $T_{П}$, полученные расчетным путем и экспериментально.

Контрольные вопросы

1. Дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье при нагревании (охлаждении) тел. Граничные условия дифференциального уравнения Фурье.

2. Как определить величину коэффициента температуропроводности? Как связаны понятия «теплоинерционность» и «температуропроводность»?

3. Суть теории обработки эксперимента. Что представляет собой безразмерная температура? Как она определяется?

4. Что представляет собой число Био? Как оно определяется?

5. Что такое число Фурье и как вычисляется?

Лабораторная работа № 6–7

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ ВОЗДУХА ОКОЛО ГОРИЗОНТАЛЬНОГО И ВЕРТИКАЛЬНОГО ЦИЛИНДРОВ

Цель работы: экспериментальное определение коэффициента теплоотдачи горизонтального и вертикального гладкого цилиндра при свободной конвекции воздуха в неограниченном пространстве.

Теоретическая часть

Конвективный теплообмен осуществляется вследствие переноса теплоты движущимися потоками газа или жидкости, при этом перенос теплоты осуществляется одновременно конвекцией и теплопроводностью.

При свободной конвекции движение среды вызывается подъемными силами, возникающими в результате действия температур.

При вынужденной конвекции движение среды возникает под действием внешних сил.

Конвективный теплообмен между потоком теплоносителя и поверхностью описывается формулой Ньютона–Рихмана:

$$Q_k = \alpha(t_{\text{п}} - t_{\text{ср}})F, \quad (6.1)$$

где Q_k – поток тепла, Вт; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² · °С); $t_{\text{п}}$, $t_{\text{ср}}$ – температура поверхности и движущейся среды, соответственно, °С; F – площадь теплоотдающей поверхности, м².

Численное значение коэффициента теплоотдачи α , Вт/(м² · °С) равно тепловому потоку, отданному (или воспринятому) 1 м² поверхности теплообмена при разности температур между поверхностью твердого тела и жидкостью в один градус. Коэффициент теплоотдачи представляет собой сложную функцию большого числа переменных величин, обуславливающих процесс конвективного переноса тепла, и зависит от температуры, условий движения среды (ламинарное, турбулентное), рода и свойств жидкости, теплоемкости и т. д. Поэтому в большинстве случаев на практике применяют экспериментальное определение коэффициента теплоотдачи методами теплового моделирования или рассчитывают с помощью критериальных уравнений.

Критериальное уравнение для свободной конвекции имеет вид:

$$\text{Nu} = c(\text{Gr} \cdot \text{Pr})^n. \quad (6.2)$$

Критериальное уравнение для вынужденной конвекции имеет вид:

$$\text{Nu} = A \cdot \text{Re}^m \cdot \text{Pr}^k, \quad (6.3)$$

где c , A , n , m , k – коэффициенты и показатели степени, определенные экспериментально.

Критерий Грасгофа (критерий подъемной силы) характеризует подъемную силу, возникающую в жидкости вследствие разности плотностей, а также кинематическое подобие при свободном движении жидкости.

$$\text{Gr} = \frac{g\beta\Delta t l^3}{\nu^2}, \quad (6.4)$$

где $\text{Gr} = \frac{g\beta\Delta t l^3}{\nu^2}$ – ускорение свободного падения, м/с²; $\beta = 1/T$ – коэффициент линейного расширения, 1/К; $\Delta t = t_{\text{п}} - t_{\text{с}}$ – температурный

напор, °С; l – определяющий размер (диаметр в случае горизонтальной трубы, длина в случае вертикальной трубы), м; ν – кинематическая вязкость, м²/с.

Критерий Рейнольдса (критерий режима движения) характеризует соотношение сил инерции и вязкости и определяет гидродинамический режим движения:

$$Re = \frac{\omega l}{\nu}, \quad (6.5)$$

где ω – скорость среды, м/с.

Критерий Прандтля (критерий физических свойств жидкости) характеризует физические свойства жидкости и способность распространения тепла в жидкости:

$$Pr = \frac{\nu}{a}, \quad (6.6)$$

где a – коэффициент теплопроводности, м²/с.

Критерий Нуссельта (критерий теплоотдачи) характеризует отношение между интенсивностью теплоотдачи и температурным полем в пограничном слое потока:

$$Nu = \frac{\alpha_k l}{\lambda}, \quad (6.7)$$

где λ – коэффициент теплопроводности среды, Вт/(м · °С).

Все значения физических свойств среды, используемые при расчете критериев зависят от температуры и выбираются из таблицы при средней температуре воздуха и поверхности.

В общем тепловой поток Q складывается из теплового потока Q_k , передаваемого конвекцией, и теплового потока Q_l , передаваемого излучением:

$$Q = Q_k + Q_l. \quad (6.8)$$

Для определения коэффициента теплоотдачи конвекцией необходимо из общего теплового потока Q исключить тепловой поток излучением, величина которого вычисляется по уравнению Стефана–Больцмана, Вт:

$$Q_l = \varepsilon c_0 \left[\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right] F, \quad (6.9)$$

где ε – степень черноты теплоотдающей поверхности; $c_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела; $T_{\text{п}} = 273,15 + t_{\text{п}}$, $T_{\text{с}} = 273,15 + t_{\text{с}}$ – абсолютная температура поверхности и движущейся среды, К.

Количество теплоты, отводимой конвекцией $Q_{\text{к}}$, Вт, определяется из выражения

$$Q_{\text{к}} = Q - Q_{\text{л}}, \quad (6.10)$$

где Q – подводимая мощность, Вт.

Для жидкостей $Q_{\text{л}} = 0$.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$:

$$\alpha_{\text{к}} = \frac{Q_{\text{к}}}{F(t_{\text{п}} - t_{\text{с}})}. \quad (6.11)$$

Следовательно, для определения значения $\alpha_{\text{к}}$ необходимо в стационарном тепловом режиме измерить Q , геометрические размеры тела, участвующего в конвективном теплообмене, и среднюю температуру поверхности тела и среды.

Реализация цели работы достигается на опытной круглой трубе, расположенной в неограниченном объеме воздуха, с помощью экспериментальной установки.

Описание экспериментальной установки

Опытная труба 1 (рис. 6.1) представляет отрезок стальной трубы длиной $l = 475$ мм наружного диаметра $d = 38$ мм. Снаружи поверхность трубы покрыта тонким слоем никеля. Внутри трубы 1 помещен электрический нагреватель 2, питаемый переменным током, мощность которого регулируется. Торцевые сечения трубы заделаны текстолитовыми дисками 4, предотвращающими осевые утечки тепла. На поверхности опытной трубы установлено пять термопреобразователей 3, из которых три преобразователя равномерно размещены по длине вдоль образующей трубы, а два оставшихся расположены на диаметрально противоположной образующей. Это позволяет измерить среднюю температуру поверхности стенки $t_{\text{ст}}$ трубы.

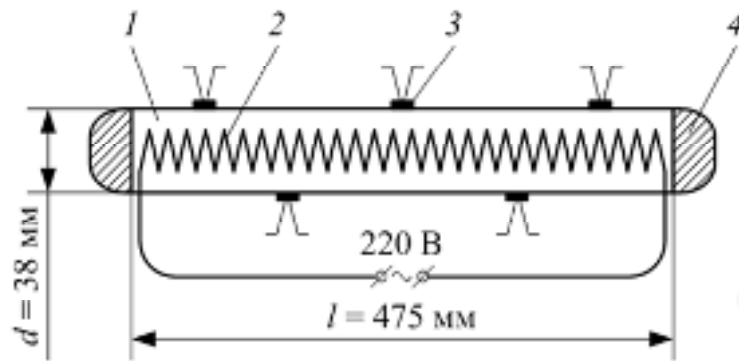


Рис. 6.1. Опытная горизонтальная труба

Схема подсоединения опытной трубы к измерительной аппаратуре изображена на рис. 6.2. Провода термопреобразователей и электронагревателя собраны в единый жгут, помещенный в изоляционный шланг 5 с разъемным штекером 6, который вставляется в соответствующее гнездо на панели 7 стенда. Приборы на стенде показывают температуру стенки $T_{ст}$, °С; температуру окружающего воздуха $T_{в}$, °С, и тепловой поток Q , Вт (подведенную электрическую мощность N , Вт).

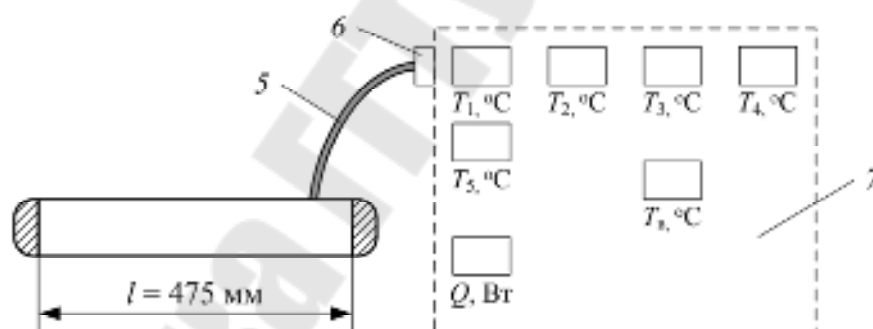


Рис. 6.2. Схема присоединения опытной трубы к приборному щиту

Эксперимент проводится при заданной преподавателем величине теплового потока Q , которая выставляется регулятором РН1 на стенде и начинается нагрев трубы. Наблюдают за показаниями температур t_1, t_2, t_3, t_4, t_5 , °С, во времени и по достижении неизменности их значений считают, что наступил стационарный тепловой режим. По достижении такого режима значения температур температуры воздуха $t_{в}$, °С, и теплового потока Q , Вт, заносят в табл. 6.1.

Протокол наблюдений

Номер режима	Тепловой поток Q , Вт	Температура воздуха $t_{в}$, °С	Температура поверхности стенки трубы в локальных точках, °С				
			t_1	t_2	t_3	t_4	t_5
I							
II							
III							

По завершении опыта на I режиме задают новые значения Q поворотом ручки РН1 и повторяют опыт во II режиме аналогично той же последовательности выполнения операций I режима. Затем выполняют опыт в III режиме при ином Q . По окончании опытов выключают установку и приступают к обработке результатов наблюдений.

Порядок выполнения измерений

1. Убедиться в том, что переключатели SA1, SA2 (Насос-1), SA4 (Насос-2), SA5, SA6, SA14, SA15, SA16 установлены в положение «0» (выключены).
2. На блоке переключателей «СЕТЬ» перевести сначала тумблер QF1 в положение «вкл» (вверх), а затем тумблер QF2 также в положение «вкл» (вверх).
3. Установить индикацию стенда на выполнение работы «L3».
4. Регулятором SA14 и SA15 устанавливают требуемую мощность электронагревателя по заданию преподавателя.
5. По достижению стационарного режима записывают результаты измерения.

Порядок операций по выключению установки

1. Регуляторами SA14 и SA15 выводят мощность электронагревателя на нулевое значение.
2. Выводят установку из работы последовательным переводом QF2 и QF1 в положение «выкл» (нижнее).

Обработка результатов измерений

В части I необходимо определить и сопоставить значения коэффициентов теплоотдачи конвекцией α_k , полученные расчетным и экс-

периментальным путем. Для выполнения части I необходимо заполнить табл. 6.1.

В части II требуется записать критериальное уравнение М. А. Михеева для свободной конвекции, в котором значения коэффициентов s и n определить графическим способом. Сопоставить полученные значения со значениями, указанными в справочных таблицах.

В части III количественно сопоставить долю переноса тепла излучением в общей теплопередаче и конвективной составляющей при свободном движении воздуха; сделать заключение о преобладающем механизме теплопереноса (конвективном или лучистом).

Далее приведены рекомендации по выполнению каждой части. Расчеты выполняются для тепловых режимов I, II, III.

Часть I

1. Определить абсолютную среднюю температуру поверхности стенки трубы и движущейся среды (воздух), К:

$$T_{\text{ст}} = T_{\text{п}} = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_4}{5}; \quad (6.12)$$

$$T_{\text{в}} = T_{\text{с}} = t_{\text{в}} + 273,15. \quad (6.13)$$

2. Вычислить по формуле (6.9) лучистую составляющую $Q_{\text{л}}$ теплового потока, принимая для никелированной трубы $\varepsilon = 0,11$, а теплоотдающую поверхность $F = \pi dl$, м².

3. По формуле (6.10) определить величину теплового потока, переданного свободной конвекцией воздуху, а далее по формуле (6.11) вычислить конвективный коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\text{конт}}$.

4. Для распространения результатов, полученных при проведении опытов с круглой трубой конкретных диаметра (при горизонтальном положении) или высоты (при вертикальном положении), на все многообразие геометрически подобных труб согласно теории подобия необходимо представлять независимые переменные и функции в виде безразмерных чисел (критериев) подобия. В качестве независимой переменной при свободной конвекции потока в соответствии с формулой (6.2) выбирается число подобия Грасгоффа, определяемое по формуле (6.4), и число Прандтля, определяемое по формуле (6.6).

При определении значения чисел подобия принимаем:

– коэффициент температурного расширения $\beta = 1/T_{\text{в}}$;

– при горизонтальном расположении опытной трубы $l = d$, при вертикальном расположении $l = h$;

– значения λ , ν , a и числа Pr выбираются из таблиц теплофизических свойств воздуха при атмосферном давлении 0,1 МПа от характерной для каждого теплового режима I, II, III средней температуры пограничного слоя воздуха, °С:

$$t_T = 0,5(t_{CT} + t_B). \quad (6.14)$$

5. Вычислять для каждого режима число Релея:

$$Ra = Gr \cdot Pr. \quad (6.15)$$

Определить значения коэффициентов C и n для горизонтальной/вертикальной ориентации опытной трубы по справочной таблице.

6. По уравнению (6.2) для каждого теплового режима при соответствующих ему $Gr \cdot Pr$ определить расчетное среднее значение Nu_p , которое необходимо сравнить с опытным (экспериментальным) значением $Nu_{оп}$ по (6.7).

Аналогично выполняют расчеты и сравнительное сопоставление чисел Nu для вертикальной трубы.

7. Определить расчетное значение коэффициента теплоотдачи $\alpha_{кр}$, выразив его из соотношения (6.7) при известном Nu_p и характерном линейном размере l .

Определить относительное расхождение между опытными и расчетными значениями коэффициента теплоотдачи.

Часть II

1. Для экспериментального определения коэффициента c и показателя степени n в критериальном уравнении для свободной конвекции, необходимо его прологарифмировать, т. е.

$$\lg Nu = \lg c + n \lg(Gr \cdot Pr). \quad (6.16)$$

Определить значения $\lg Nu$ и $\lg(Gr \cdot Pr)$, построить графическую зависимость $\lg Nu_{оп} = f[\lg(Gr \cdot Pr)]$.

Показатель степени n определяется, как показано на рис. 6.3, а искомый коэффициент определяется из соотношения

$$c = \frac{Nu_{оп}}{(Gr \cdot Pr)^n}. \quad (6.17)$$

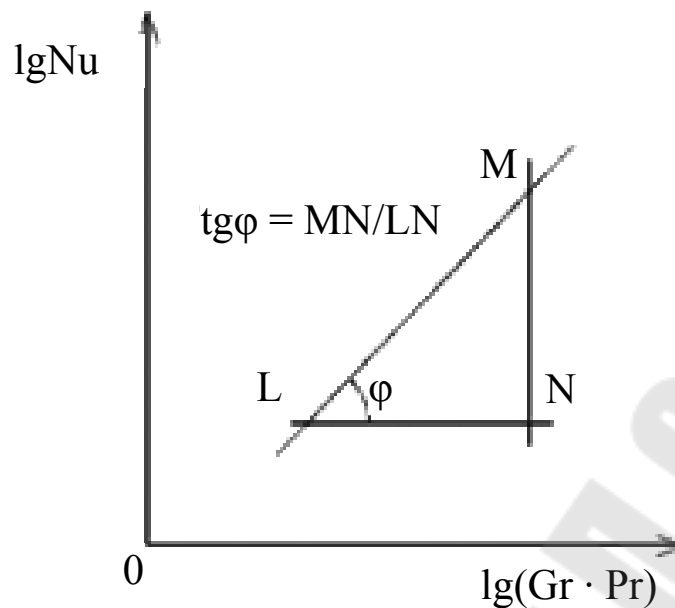


Рис. 6.3. Определение показателя степени n

Часть III

1. Определим средний коэффициент теплоотдачи α к воздуху:

$$\alpha = \frac{Q}{F(t_{\text{п}} - t_{\text{с}})} \quad (6.18)$$

2. Определить коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\text{л}}$ с поверхности трубы к воздуху излучением:

$$\alpha_{\text{л}} = \alpha - \alpha_{\text{коп}} \quad (6.19)$$

Сравнение между собой $\alpha_{\text{коп}}$ и $\alpha_{\text{л}}$ позволяет представить количественное значение переноса тепла излучением в общей теплоотдаче и конвективной составляющей при свободном движении воздуха.

Результаты обработки наблюдений сводятся в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Опытные и расчетные данные при свободной конвекции воздуха

Номер режима	$Q_{\text{л}}, \text{Вт}$	$Q_{\text{к}}, \text{Вт}$	$(t_{\text{п}} - t_{\text{с}}), ^\circ\text{C}$	$\text{Gr} \cdot \text{Pr}$	$\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$			$\text{Nu}_{\text{оп}}$	$\text{Nu}_{\text{р}}$	$\frac{\alpha_{\text{л}}}{\alpha_{\text{к}}}$	$\frac{\alpha_{\text{л}}}{\alpha}$
					$\alpha_{\text{к}}$	$\alpha_{\text{л}}$	α				
I											
II											
III											

Анализ полученных результатов

Результаты расчетов представить в виде табл. 6.3.

В выводе работы сделать сравнение теоретического и экспериментального значения числа Нуссельта, сделать заключение об источнике погрешностей и преобладающем механизме теплопереноса (конвективном или лучистом) в рассматриваемой системе.

Таблица 6.3

Исследование теплопередачи при естественной конвекции

воздуха около _____ цилиндра
(горизонтального/вертикального)

Наименование величины		Номер опыта		
		1	2	3
Длина трубы l , м		0,475		
Наружный диаметр трубы d , м		0,034		
Площадь поверхности опытной трубы $F = \pi dl$, м ²				
Мощность нагревателя $Q = N$, Вт				
Температура поверхности стенки трубы в локальных точках t_{ct_i} , °C	Номера термопар	1		
		2		
		3		
		4		
		5		
Средняя температура стенки трубы	$t_{ct} = \sum_{i=1}^5 t_{ct_i} / 5$			
	$T_{ct} = T_{\Pi} = t_{ct} + 273,15 \text{ К}$			
Температура окружающего воздуха t_B , °C				
$T_B = T_C = t_B + 273,15 \text{ К}$				
Средняя температура пограничного слоя	$t_T = 0,5(t_{ct} + t_B)$, °C			
	$T_T = t_{ct} + 273,15 \text{ К}$			
Перепад температур между наружной поверхностью опытной трубы и окружающей средой $\Delta t_i = t_{ct_i} - t_B$, °C	Номера термопар	1		
		2		
		3		
		4		
		5		
Средний перепад температур между наружной поверхностью опытной трубы и окружающей средой $\Delta \bar{t} = \sum_{i=1}^5 \Delta t_i / 5$				

Наименование величины	Номер опыта		
	1	2	3
Тепловой поток, передаваемый от опытной трубы в окружающую среду путем излучения, $Q_{\text{л}} = \varepsilon c_0 \left[\left(\frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{с}}}{100} \right)^4 \right] F$, Вт			
Тепловой поток, передаваемый от опытной трубы в окружающую среду конвекцией, $Q_{\text{к}} = Q - Q_{\text{л}}$, Вт			
Опытное значение коэффициента теплоотдачи, $\alpha_{\text{конт}} = \frac{Q_{\text{к}}}{F(t_{\text{ст}} - t_{\text{в}})}$, Вт/(м ² · °С)			
Теплофизические свойства воздуха при $t_{\text{т}}$	λ , Вт/(м · К)		
	ν , м ² /с		
	$\beta = 1/T_{\text{в}}$, К ⁻¹		
Число Прандтля Pr			
Число Грасгофа $Gr = \frac{g\beta\Delta\bar{t}l^3}{\nu^2}$			
Число Релея Ra = Gr · Pr			
Значения коэффициентов c , n	c		
	n		
Число Нуссельта $Nu_{\text{п}} = c(Gr \cdot Pr)^n$			
Число Нуссельта $Nu_{\text{онт}} = \frac{\alpha_{\text{конт}} l}{\lambda}$			
Расчетное значение коэффициента теплоотдачи $\alpha_{\text{кр}} = \frac{Nu_{\text{п}} \lambda}{l}$, Вт/(м ² · °С)			
$\delta_{\alpha} = 100\%(\alpha_{\text{конт}} - \alpha_{\text{кр}})/\alpha_{\text{конт}}$			

Контрольные вопросы

1. Дать определение понятий: конвективный теплообмен, естественная и вынужденная конвекция. Записать критериальное уравнение для свободной и вынужденной конвекции.

2. Как количественно оценить интенсивность конвективного теплообмена? Пояснить физический смысл коэффициента теплоотдачи. Закон Ньютона–Рихмана.

3. Сущность теории подобия. Основные числа подобия: математическая запись, физическая сущность.

4. Записать уравнение теплового баланса рассматриваемой системы. Как определить значения величин, составляющих баланс?

5. Пояснить, как влияет ориентация в пространстве теплоотдающей поверхности на выбор ее характерного линейного размера.

6. Как графическим и расчетным способом определяются значения коэффициента C и степени n в уравнении М. А. Михеева?

7. Как экспериментальным и расчетным способом определяются значения коэффициента теплоотдачи?

Лабораторная работа № 8

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ДВИЖЕНИИ ВОЗДУХА В ТРУБЕ

Цель работы: экспериментальное определение коэффициента теплоотдачи при вынужденном движении воздуха в кольцевом канале.

Теоретическая часть

Количественной характеристикой интенсивности теплоотдачи является коэффициент теплоотдачи, который при экспериментальном определении рассчитывается из уравнения (8.1), Вт/(м² · К):

$$\alpha = \frac{Q}{F(t_{\text{п}} - t_{\text{в}})}. \quad (8.1)$$

Коэффициент теплоотдачи представляет величину плотности теплового потока при перепаде температур между поверхностью и окружающей средой в один градус. Коэффициент теплоотдачи может быть вычислен расчетным путем при известной скорости движения воздуха, его свойствах и геометрических размерах исследуемой поверхности.

Описание экспериментальной установки

Опытный кольцевой канал (рис. 8.1) конструктивно представляет стальную трубу, в которой коаксиально размещен цилиндр меньшего

диаметра. Труба 4 теплоизолирована снаружи. Цилиндр 5 равномерно нагревается электрическим током заданной мощности. Длина цилиндра 5 $l = 470$ мм. Диаметр цилиндра $d = 9,6$ мм, внутренний диаметр трубы $D = 37$ мм. Холодный воздух за счет работы вентиляторов 7 засасывается в трубу и, проходя анемометр 2, поступает в кольцевой канал, в котором нагревается от цилиндра 5. После кольцевого канала воздух выходит через секции вентиляторов 7 в окружающую среду.

На поверхности нагреваемого цилиндра равномерно по длине установлены датчики для измерения температур поверхности t_1, t_2, t_3, t_4 . На входе и выходе кольцевого канала установлены датчики для измерения температуры воздуха t' и t'' соответственно. Анемометром 2 измеряется скорость движения воздуха, которая затем обрабатывается электронной системой стенда и представляется в виде объемного расхода V .

Порядок выполнения измерений

Предполагается, что опытный образец уже установлен на панели стенда. Эксперимент проводится при заданной мощности электронагревателя цилиндра и вентиляторов. В течение эксперимента с интервалом 5 мин записываются показания приборов: объемный расход воздуха V , л/с; температуры поверхности цилиндра t_1, t_2, t_3, t_4 , °С, температуры воздуха на входе и выходе кольцевого канала t' и t'' , °С, которые высвечиваются горячей индикацией на приборной панели стенда. Запись показаний проводится до наступления стационарного теплового режима, о достижении которого судят по установившимся показаниям температур. Запись, являющаяся последней при установлении стационарного режима, используется при последующей обработке результатов эксперимента. Записи заносят в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Значения измеренных величин

Номер опыта	τ , мин	Показания приборов						
		t_1 , °С	t_2 , °С	t_3 , °С	t_4 , °С	t' , °С	t'' , °С	V , л/с
...

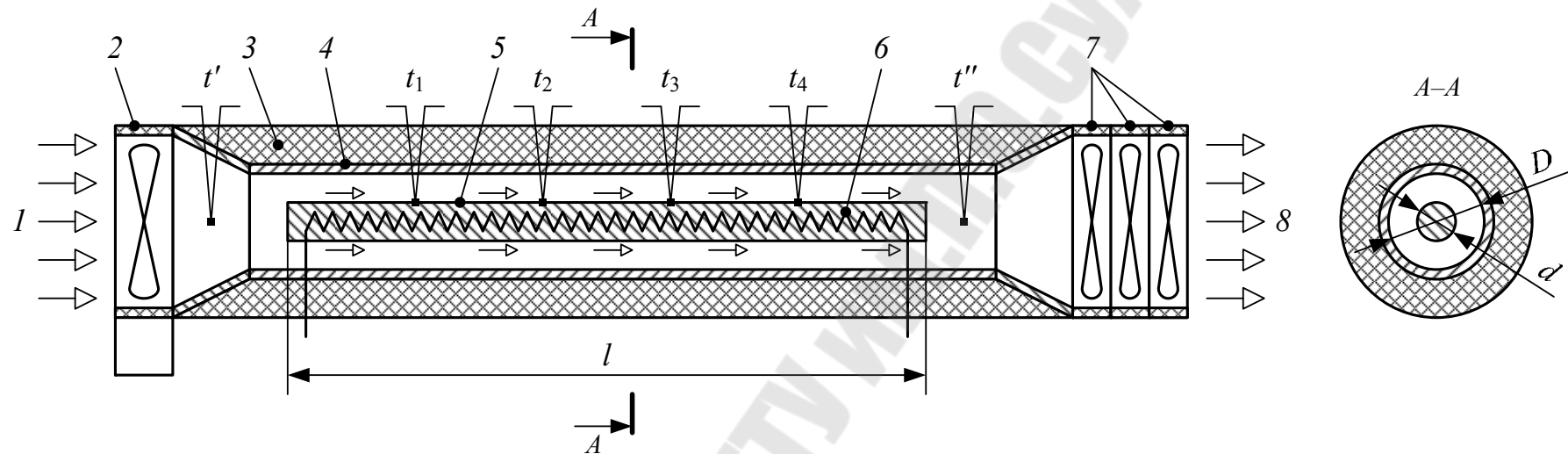


Рис. 8.1. Схема экспериментального образца:

1 – подача окружающего воздуха; 2 – анемометр (измеритель расхода воздуха);

3 – тепловая изоляция; 4 – внешняя труба; 5 – внутренняя нагреваемая труба;

6 – электронагревательный элемент; 7 – секции вентиляторов; 8 – выход нагретого воздуха

На схеме обозначения датчиков температур соответствуют обозначениям измеряемых ими температур:

t' – для измерения температуры воздуха на входе кольцевого канала; t'' – для измерения температуры воздуха на выходе кольцевого канала; t_1 – t_4 – для измерения температуры поверхности по длине нагреваемого цилиндра

Порядок операций по включению установки в работу

1. Убедиться в том, что переключатели SA1, SA2 (Насос-1), SA4 (Насос-2), SA5, SA6, SA14, SA15, SA16 установлены в положение «0» (выключены).
2. На блоке переключателей «СЕТЬ» перевести сначала тумблер QF1 в положение «вкл» (вверх), а затем тумблер QF2 также в положение «вкл» (вверх).
3. Установить индикацию стенда на выполнение работы «L4».
4. Поворотом выключателя SA16 задать требуемую мощность вентиляторов по заданию преподавателя (значение мощности в Вт высвечивается на табло PH2, Вт).
5. Поворотом выключателей SA14 и SA15 установить мощность электронагревателя по заданию преподавателя (значение мощности в Вт высвечивается на табло PH1, Вт).
6. Провести замеры температур и объемного расхода до наступления установившегося режима.

Порядок операций по выключению установки

1. Переключателями SA14 и SA15 вывести мощность электронагревателя на нулевое значение.
2. Переключателем SA16 вывести мощность вентиляторов на нулевое значение.
3. Вывести установку из работы последовательным переводом QF2 и QF1 в положение «выкл» (нижнее).

Обработка результатов измерений

1. Определяем среднее значение температуры воздуха $t_{\text{в}}$ и теплообменной поверхности $t_{\text{п}}$:

$$t_{\text{в}} = 0,5(t' + t''); \quad (8.2)$$

$$t_{\text{п}} = \sum_{i=1}^4 t_i / 4. \quad (8.3)$$

2. По таблице физических свойств воздуха при атмосферном давлении по значению определяющей температуры $t_{\text{т}}$ находят плотность ρ , кг/м³, коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м · К); удель-

ную массовую изобарную теплоемкость c_p , кДж/(кг · К); коэффициент кинематической вязкости ν , м²/с, число Прандтля Pr :

$$t_T = 0,5(t_B + t_H). \quad (8.4)$$

3. Определим массовый расход воздуха:

$$G = V\rho, \text{ кг/с.} \quad (8.5)$$

4. Тепловой поток, переданный воздуху от нагретой стенки:

$$Q = Gc_p(t'' - t'), \text{ Вт.} \quad (8.6)$$

5. По формуле (8.1) определить опытный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² · К).

6. Средняя скорость движения воздуха в кольцевом канале:

$$\omega = \frac{V}{f} = \frac{4V}{\pi(D^2 - d^2)}, \text{ м/с,} \quad (8.7)$$

где f – площадь поперечного сечения кольцевого канала, м².

7. Число Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{\omega d_3}{\nu} = \frac{\omega(D-d)}{\nu}, \quad (8.8)$$

где $d_3 = D - d$ – эквивалентный диаметр кольцевого канала, м.

8. По значению числа Рейнольдса установить режим течения воздуха и выбрать соответствующую формулу для расчета числа Нуссельта.

При $\text{Re} < 2300$ имеет место ламинарный режим течения. В этом случае число Нуссельта для воздуха определяется по формуле

$$\text{Nu} = 0,13\text{Re}^{0,33}\varepsilon_l, \quad (8.9)$$

где $\varepsilon_l = f(l/d_3, \text{Re})$ – поправочный коэффициент на длину трубы. Если $l/d_3 \geq 50$, то $\varepsilon_l = 1$.

При $\text{Re} \geq 10000$ имеет место развитый турбулентный режим течения. В этом случае число Нуссельта для воздуха определяется по формуле

$$\text{Nu} = 0,018\text{Re}^{0,8}\varepsilon_l. \quad (8.10)$$

9. Зная число Нуссельта, можно определить коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda}{d_3}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (8.11)$$

При переходном режиме течения ($2300 \leq \text{Re} \leq 10^4$) коэффициент теплоотдачи α вычисляют по формуле

$$\alpha = \alpha_T \eta_T, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \quad (8.12)$$

где α_T – коэффициент теплоотдачи при развитом турбулентном режиме, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; η_T – поправочный коэффициент на режим движения из табл. 8.2.

Таблица 8.2

Значения поправочного коэффициента на режим движения

Re · 10⁻³	2,2	2,5	3	4	5	6	7	8	9	10
η_T	0,42	0,5	0,57	0,7	0,81	0,89	0,94	0,97	0,98	1,0

Полученный коэффициент теплоотдачи сравнить с опытным, определенным по формуле (8.2). Следует объяснить причину расхождения.

10. Относительная максимальная погрешность измерения α имеет вид:

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \frac{|\alpha_{\text{оп}} - \alpha_p| \cdot 100\%}{\alpha_{\text{оп}}}. \quad (8.13)$$

Контрольные вопросы

1. Дать определение понятий: конвективный теплообмен, свободная и вынужденная конвекция. Закон Ньютона–Рихмана.
2. Критериальное уравнение для вынужденной конвекции при продольном обтекании теплопередающей поверхности движущейся средой.
3. Соотношения для определения коэффициента теплоотдачи при различных режимах движения.
4. Схема экспериментальной установки, методика выполнения измерений. Обработка результатов измерений.

Лабораторная работа № 9

ТЕПЛОТДАЧА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ОРЕБРЕННОЙ ТРУБЫ ПРИ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ

Цель работы: экспериментально изучить механизм свободной конвекции горизонтальной оребренной трубы, определить приведенный коэффициент теплообмена и коэффициент эффективности ребер.

Описание экспериментальной установки

Установка предназначена для экспериментального определения коэффициентов теплоотдачи горизонтальной оребренной трубы к окружающему воздуху при нагреве поверхности трубы от 30 до 130 °С с полной погрешностью не более 0,6 Вт/(м · К), или 7 %. При этом в указанном диапазоне изменения температуры среднеквадратическое отклонение опытных данных от расчетных по критериальной зависимости составляет не более 30 %.

Максимально допустимая температура поверхности опытной трубы не более 130 °С (150 Вт нагрузки на ТЭН).

В качестве рабочего участка используется оребренная стальная труба с коаксиально расположенным внутри трубчатым электронагревателем 11 (рис. 9.1).

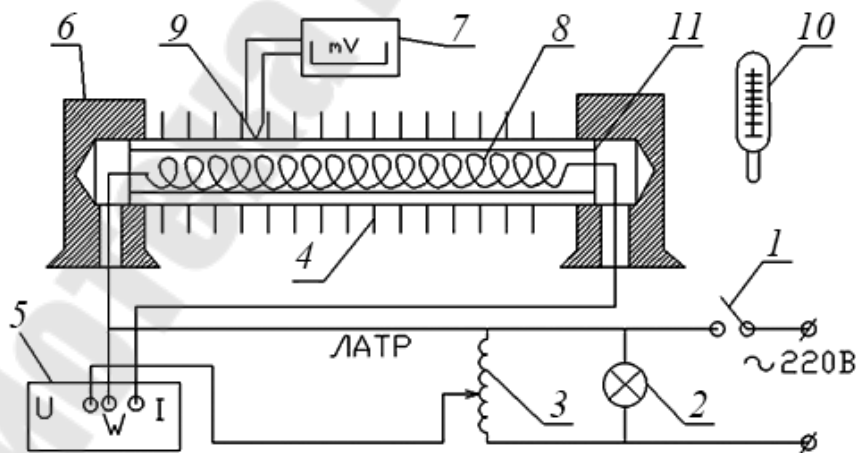


Рис. 9.1. Схема установки:

- 1 – выключатель; 2 – сигнальная лампа; 3 – ЛАТР; 4 – оребренная труба; 5 – ваттметр; 6 – стойка; 7 – многоканальный цифровой измеритель температуры; 8 – спираль электронагревателя; 9 – горячие спаи термопар (Т1–Т9); 10 – термометр; 11 – ТЭН

Параметры оребренной трубы следующие: длина $l = 562$ мм; диаметр трубы $d = 25$ мм; ребра круглой формы; наружный диаметр ребра $D_p = 40$ мм; шаг между ребрами $t_p = 3,65$ мм; толщина ребра $\delta_p = 1,0$ мм; количество ребер на трубе $n_p = 103$ шт.

Потребляемая мощность ТЭН регулируется лабораторным автотрансформатором (ЛАТР) 3 и измеряется ваттметром 5 Д5067 класса 0,5.

Температура наружной стенки трубы и ребер измеряется с помощью восьми хромель-алюмелевых термопар стандартной градуировки с чувствительностью 41 мкВ/К и предельной допустимой погрешностью не более 0,16 мВ по ГОСТ 3044–74. Термопары 0,5 мм изолированы кремнеземной нитью. Горячие спаи термопар зачеканены в тело трубы и ребер в соответствии с требованиями теплофизических измерений.

ТермоЭДС измеряется милливольтметром 7 А565 класса 0,1 с цифровой индикацией температуры и с внутренней компенсацией термоЭДС свободных концов термопар.

Температура окружающей среды измеряется отдельно установленной термопарой, показания которой выносятся на прибор А565, и контролируются жидкостным термометром 10.

Порядок выполнения измерений

1. Включить тумблер питания установки 1. При этом загорается сигнальная лампочка 2 и табло цифровой индикации милливольтметра 7.

2. С помощью ЛАТР 3 и ваттметра 5 выставляется начальное значение мощности ТЭН 11. В течение некоторого интервала времени осуществляется выход установки на тепловой режим. Наступление установившегося теплового режима определяется по неизменным показаниям всех термопар 7.

3. С интервалом 2–3 мин проводится серия измерений мощности ТЭН; температур стенки и ребер, а также температуры окружающего воздуха.

4. Установка переводится на новый тепловой режим увеличением или уменьшением электрической нагрузки на ТЭН. Регистрируется наступление установившегося режима и повторяются измерения.

5. Выключение установки производится в обратном порядке. Во время опытов следует избегать движений около трубы.

6. Результаты опытов заносят в табл. 9.1.

Экспериментальные данные по теплоотдаче ребренной трубы

Номер опыта	Время выхода на режим t , мин	Мощность электрического нагревателя W , Вт	Показания термопар, °С								Температура воздуха t_{cp} , °С
			Ребра				Гладкая стенка				
			t_1	t_3	t_5	t_7	t_2	t_4	t_6	t_8	
1											
2											
3											

Обработка результатов измерений

1. Тепловой поток, передаваемый горизонтальной ребристой трубой, определяется мощностью нагревателя.

$$Q_p = W, \quad (9.1)$$

где W – мощность нагревателя, Вт.

2. Средняя температура стенки определяется по соотношению (9.2):

$$t_c = \sum_{i=1}^4 t_{c_i} / 4, \quad (9.2)$$

где t_{c_i} – значение температуры каждой из 4 термопар, установленных на гладкой стенке, не занятой ребрами.

3. Средняя температура ребер определяется по соотношению (9.3):

$$t_p = \sum_{i=1}^4 t_{p_i} / 4, \quad (9.3)$$

где t_{p_i} – значение температуры каждой из 4 термопар, установленных на ребрах.

4. Средняя температура окружающего воздуха определяется по соотношению (9.4):

$$t_{cp} = \sum_{i=1}^n t_{cp_i} / n, \quad (9.4)$$

где t_{cp_i} – показания термопары (жидкостного термометра).

5. Экспериментальное значение эффективности ребер определяется по соотношению (9.5):

$$E_{\text{эксп}} = \frac{t_p - t_{\text{ср}}}{t_c - t_{\text{ср}}}. \quad (9.5)$$

6. Коэффициенты теплоотдачи ребристой стенки:

6.1. Приведенный коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_{\text{пр}} = \frac{Q_p}{F_{\text{п}}(t_c - t_{\text{ср}})}. \quad (9.6)$$

6.2. Коэффициент теплоотдачи, отнесенный к поверхности гладкой стенки:

$$\alpha_{\text{гл}} = \frac{Q_p}{F_{\text{гл}}(t_c - t_{\text{ср}})}. \quad (9.7)$$

6.3. Коэффициент теплоотдачи ребристой стенки:

$$\alpha_p = \frac{Q_p}{F_{\text{гл}}(t_c - t_{\text{ср}})[E_{\text{эксп}}(\varphi - 1) + 1]}, \quad (9.8)$$

где $F_p = 0,173$ – поверхность ребер, м^2 ; $F_{\text{гл}} = 0,034$ – поверхность гладкой трубы, не занятая ребрами, м^2 ; $F_{\text{п}} = F_{\text{гл}} + F_p = 0,206$ – полная поверхность ребристой трубы, м^2 ; $\varphi = F_{\text{п}}/F_{\text{гл}}$ – коэффициент оребрения.

Результаты расчетов заносят в табл. 9.2.

Таблица 9.2

Результаты расчета

Номер опыта	t_c , °C	t_p , °C	$(t_c - t_{\text{ср}})$, °C	$(t_p - t_{\text{ср}})$, °C	$\alpha_{\text{пр}}$, Вт/м ² · °C	$\alpha_{\text{гл}}$, Вт/м ² · °C	α_p , Вт/м ² · °C	$E_{\text{эксп}}$
1								
2								
3								

Контрольные вопросы

1. Физическая сущность конвективного теплообмена. Виды конвективного теплообмена.
2. Записать математическое выражение закона Ньютона–Рихмана. Объяснить физический смысл коэффициента теплообмена.
3. Общий вид критериальных уравнений конвективного теплообмена.
4. Физический смысл критериев Нуссельта, Рейнольдса, Прандтля и Грасгофа.
5. В чем смысл использования ребрения.
6. Расчет коэффициента теплоотдачи ребристой стенки, приведенного коэффициента теплоотдачи, коэффициента эффективности ребер.

Лабораторная работа № 10

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛОВ КАЛОРИМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Цель работы: изучение процесса лучистого теплообмена, экспериментальное определение степени черноты нити накала электролампочки и ее зависимости от температуры.

Теоретическая часть

Тепловое излучение представляет собой процесс распространения внутренней энергии излучающего тела путем электромагнитных волн. Излучение имеет двойственный характер, так как обладает свойствами непрерывности поля электромагнитных волн и свойствами дискретности, типичными для фотонов. Синтезом обоих свойств является представление, согласно которому энергия и импульсы сосредоточиваются в фотонах, а вероятность нахождения их в том или ином месте пространства – в волнах.

Количественное различие в длине электромагнитных волн приводит к тому, что общие стороны явлений для разных длин волн проявляются с различной отчетливостью: квантовые (корпускулярные) свойства проявляются наиболее отчетливо в коротковолновом излучении, а волновые свойства – у радиоволн.

При температурах, с которыми обычно имеют дело в технике, основное количество энергии излучается при $\lambda = 0,0008-0,8$ мм. Эти лучи принято называть тепловыми (инфракрасными).

Энергия излучения, испускаемая произвольной поверхностью в единицу времени по всевозможным направлениям полупространства и соответствующая узкому интервалу длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$, называется *поток спектрального* или *однородного излучения* Q_λ .

Суммарное излучение с поверхности тела по всем длинам волн спектра называется интегральным или *полным потоком излучения* Q .

Полный поток, испускаемый с единицы поверхности, носит название поверхностной плотности потока интегрального излучения:

$$E = dQ/dF, \quad (10.1)$$

где dQ – лучистый поток, испускаемый элементарной площадкой dF , Вт.

Лучистый поток со всей поверхности выразится интегралом:

$$Q = \int_F E dF. \quad (10.2)$$

Если плотность потока интегрального излучения для всех элементов поверхности излучающего тела одинакова, то зависимость (10.2) переходит в соотношение

$$Q = EF. \quad (10.3)$$

Отношение плотности лучистого потока, испускаемого в бесконечном малом интервале длин волн, к величине этого интервала длин волн называется спектральной плотностью потока излучения:

$$E_\lambda = dE/d\lambda. \quad (10.4)$$

Уравнение теплового баланса можно записать в виде соотношения (10.5) или в безразмерной форме – (10.6):

$$E_A + E_R + E_D = E_{\text{пад}}; \quad (10.5)$$

$$A + R + D = 1, \quad (10.6)$$

где $A = E_A/E_{\text{пад}}$ – коэффициент поглощения; $R = E_R/E_{\text{пад}}$ – коэффициент отражения; $D = E_D/E_{\text{пад}}$ – коэффициент пропускания.

Тело, поглощающее все падающее на него излучение, называется абсолютно черным ($A = 1$). Тела, для которых коэффициент $A < 1$ и не зависит от длины волны падающего излучения, называются серыми. Для абсолютно белого тела $R = 1$, для абсолютно прозрачного $D = 1$.

Сумма потоков собственного и отраженного телом излучения называется его эффективным излучением:

$$E_{\text{эф}} = E + RE_{\text{пад}}. \quad (10.7)$$

Поверхностная плотность потока интегрального излучения абсолютно черного тела в зависимости от его температуры описывается законом Стефана–Больцмана:

$$E_0 = \sigma_0 T^4, \quad (10.8)$$

где $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² · К⁴) – постоянная Стефана–Больцмана.

Для технических расчетов закон Стефана–Больцмана обычно записывают в виде

$$E_0 = C_0 (T/100)^4, \quad (10.9)$$

где $C_0 = c_0 \cdot 10^8 = 5,67$ Вт/(м² · К⁴) – называется коэффициентом излучения абсолютно черного тела.

Отношение поверхностной плотности потока собственного интегрального излучения E данного тела к поверхностной плотности потока интегрального излучения E_0 абсолютно черного тела при той же температуре называется степенью черноты этого тела:

$$\varepsilon = E/E_0. \quad (10.10)$$

Степень черноты $\varepsilon = 0-1$ меняется для различных тел в зависимости от материала, состояния поверхности и температуры.

Используя понятие степени черноты, можно записать закон Стефана–Больцмана для реального тела:

$$E = \varepsilon E_0 = \varepsilon_0 C_0 (T/100)^4 = C (T/100)^4, \quad (10.11)$$

где $C = \varepsilon C_0$ – коэффициент излучения реального тела, Вт/(м² · К⁴).

Для определения результирующего потока теплового излучения между телами любой формы при произвольном их расположении в пространстве $Q_{1,2}$ может быть использовано следующее расчетное соотношение:

$$Q_{1,2} = \varepsilon_{1,2} C_0 F_{1,2} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (10.12)$$

где T_1 и T_2 – температуры «горячего» и «холодного» тел; $\varepsilon_{1,2}$ – приведенная степень черноты рассматриваемой системы; $F_{1,2}$ – приведенная площадь поверхности теплообмена рассматриваемой системы.

Если площади поверхности тел значительно отличаются друг от друга, тогда приведенные параметры равны параметрам меньшего по поверхности тела (ε_1 и F_1) и формула для расчета его коэффициента излучения принимает вид:

$$\varepsilon_1 = \frac{Q_1}{C_0 F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]} \quad (10.13)$$

Описание экспериментальной установки

Эксперимент проводится на лабораторном стенде с использованием модуля, изображенного на рис. 10.1, а. На рис. 10.1, б представлена схема опытной установки для определения коэффициента излучения электропроводящих материалов калориметрическим методом.

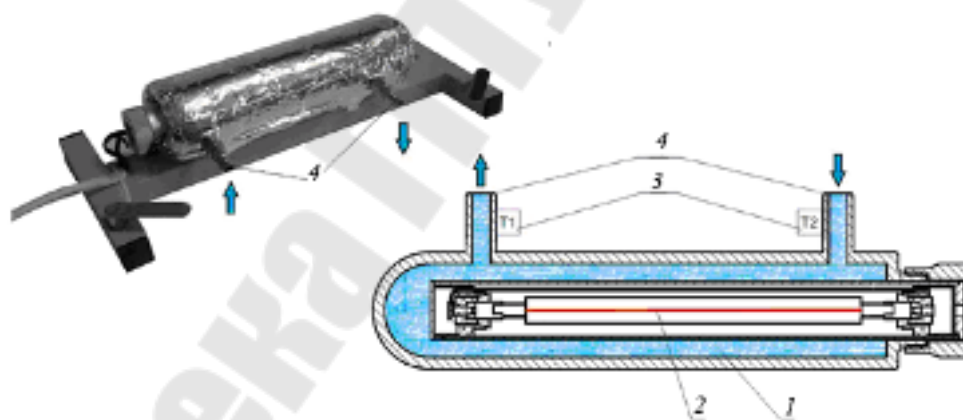


Рис. 10.1. Модуль (а) и схема опытной установки (б):

- 1 – калориметр; 2 – исследуемый образец;
- 3 – датчики температуры; 4 – подвод воды

Калориметрический метод определения коэффициента излучения заключается в том, что исследуемое тело погружается в калориметр, где участвует в теплообмене с другим телом.

Когда известно количество излучаемой энергии и температуры излучающего тела, можно рассчитать коэффициент излучения тела. В качестве образца выбрана вольфрамовая нить лампы накаливания.

Лампа заключена в металлический кожух, который является внутренней частью калориметра. Между ней и внешней частью калориметра протекает вода, температура которой измеряется на входе и выходе из калориметра.

Значительный расход воды обеспечивает постоянство температуры поверхности внутренней полости калориметра, которая является тепловоспринимающей.

Диаметр внутренней полости калориметра значительно больше диаметра проволоки. Поскольку в электролампочке в сосуде создан вакуум, то можно считать, что нагретая проволока передает тепло стенкам сосуда только излучением.

Электрическое напряжение U подается к вольфрамовой нити через регулятор напряжения – понижающий трансформатор. Сила электрического тока, проходящего через вольфрамовую нить, и его мощность измеряются амперметром и ваттметром, расположенными на панели стенда.

Вода прокачивается через калориметр насосом. Температура воды на входе $t_{\text{вх}}$ и выходе $t_{\text{вых}}$ из калориметра измеряется датчиками температуры.

Порядок выполнения измерений

1. Установить модуль на перфорированную панель и закрепить поворотом крепежных рукояток во встречном направлении на четверть оборота. Подключить кабель модуля к разъему X11 на панели стенда.

2. Убедиться в том, что переключатели установлены в положения: SA1 – «выкл», SA2 (Насос-1) – «выкл», SA3 – «нижнее», SA4 (Насос-2) – «выкл», SA5 – «выкл», SA6 – «выкл», SA14 – min, SA15 – min, SA16 – min.

3. Включить автоматические выключатели QF1 и QF2 на панели стенда. Установить профиль индикации «L6».

4. Максимально открыть вентиль синего цвета на трубопроводе. Включить клавишный выключатель SA2 (Насос-1). Это приведет в работу циркуляционный насос охлаждающей воды. Установить вентилем расход $g_1 = 0,015\text{--}0,020$ л/с.

5. Переключателями SA14 и SA15 установить мощность электронагревателя по заданию преподавателя.

6. Дождаться наступления стационарного режима теплопередачи (значения температур и плотности теплового потока перестанут изменяться) и зафиксировать показания приборов в табл. 10.1.

7. Повторить измерения при других значениях мощности электронагревателя (по указанию преподавателя).

Таблица 10.1

Данные прямых измерений и параметров установки

Наименование величины	Номер опыта		
	1	2	3
Мощность тока, проходящего через нить, P , Вт			
Сила тока, проходящего через нить, I , А			
Температура воды на входе в калориметр $t_{\text{вх}}$, °С			
Температура воды на выходе из калориметра $t_{\text{вых}}$, °С			
Сопротивление нити при комнатной температуре R_0 , Ом	4		
Диаметр нити d , мм	0,2		
Длина нити l , м	1,64		

Обработка результатов измерений

Коэффициент излучения вольфрамовой нити рассчитывается для каждого значения мощности тока по формуле (10.13). Для определения температуры нити для каждого значения силы тока следует рассчитать ее соответствующее сопротивление (закон Джоуля–Ленца). Затем, исходя из линейного закона зависимости сопротивления металла от температуры $R = R_0(1 + \alpha t)$ и используя значение сопротивления нити при комнатной температуре, можно определить температуру нити при прохождении по ней соответствующего тока. В качестве температуры поверхности теплообмена следует выбрать среднее арифметическое значение температур воды на входе и выходе из калориметра.

Расчеты выполнить в табличной форме, заполняя табл. 10.2.

Зависимость степени черноты нити от температуры представить в виде графика.

Результаты расчетов

Наименование величины		Значение величины в каждом из проведенных опытов		
		1	2	3
Сопротивление нити при прохождении тока $R = P/I^2$, Ом				
Средняя температура поверхности нити	$t_1 = \frac{R - R_0}{\alpha R_0}$, где $\alpha = 4,6 \cdot 10^{-3}$, °C ⁻¹			
	$T_1 = t_1 + 273,15$, К			
Тепловой поток, передаваемый за счет лучистого теплообмена, $Q_{\text{л}} = P$, Вт				
Средняя температура тепловоспринимающей поверхности	$t_2 = (t_{\text{вх}} + t_{\text{вых}})/2$, °C			
	$T_2 = t_2 + 273,15$, К			
Степень черноты наружной поверхности вольфрамовой нити ε (см. (10.13))				

Табличное значение степени черноты вольфрамовой нити, бывшей в употреблении на диапазоне 300–3000 К: $\varepsilon_{300\text{К}} = 0,03$; $\varepsilon_{3000\text{К}} = 0,3$.

Контрольные вопросы

1. Тепловое излучение. Волновые и корпускулярные свойства излучения, интенсивность их проявления в зависимости от длины волны.
2. Дать определение понятий: спектральный и интегральный поток излучения, поверхностная плотность потока излучения.
3. Уравнение теплового баланса в безразмерном виде.
4. Определение понятий: эффективность излучения, спектральная плотность потока излучения, эффективное излучение.
5. Закон Стефана–Больцмана для абсолютно черного и реального тела. Степень черноты.
6. Как определить величину лучистой составляющей при теплообмене излучением? Методика эксперимента и расчетов.

Лабораторная работа № 11
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ПРОЦЕССА
В ТЕПЛООБМЕННОМ АППАРАТЕ
ТИПА «ТРУБА В ТРУБЕ»

Цель работы: исследование процесса теплопередачи опытного теплообменника «труба в трубе» при прямоточном и противоточном движении теплоносителей; экспериментальное и аналитическое определение коэффициента теплопередачи.

Теоретическая часть

Перенос тепла от одной подвижной среды (горячей) к другой (холодной) через однослойную или многослойную твердую стенку любой формы называется *теплопередачей*.

Теплопередача представляет собой сложный процесс, в котором теплота передается всеми способами: теплопроводностью, конвекцией и излучением.

Рассмотрим плоскую однослойную стенку, представленную на рис. 11.1.

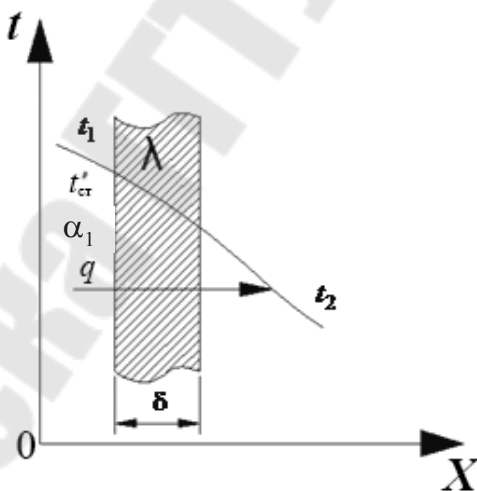


Рис. 11.1. Плоская однослойная стенка α_1

Количество теплоты, переданное горячим теплоносителем стенке путем конвективного теплообмена, определяется по уравнению Ньютона–Рихмана:

$$q = \alpha_1(t_1 - t'_{cr}), \text{ Вт/м}^2. \quad (11.1)$$

Тепловой поток, переданный теплопроводностью через плоскую стенку, определяется уравнением

$$q = \frac{\lambda}{\delta}(t'_{\text{ст}} - t''_{\text{ст}}), \text{ Вт/м}^2. \quad (11.2)$$

Тепловой поток, переданный от второй поверхности стенки к холодному теплоносителю, определяется по той же формуле конвективного теплообмена:

$$q = \alpha_2(t''_{\text{ст}} - t_2), \text{ Вт/м}^2. \quad (11.3)$$

Величины q в уравнениях (11.1)–(11.3) одинаковы, так как сколько теплоты воспринимает стенка при стационарном режиме, столько же она и отдает. Решая уравнения (11.1)–(11.3) относительно q , получим:

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \text{ Вт/м}^2. \quad (11.4)$$

В уравнении (11.4) величина $\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}\right)^{-1}$ обозначается буквой k , выражается в $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ и называется *коэффициентом теплопередачи*:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}). \quad (11.5)$$

Тогда

$$q = k(t_1 - t_2), \text{ Вт/м}^2. \quad (11.6)$$

Полученное уравнение (11.6) называется уравнением теплопередачи. Числовое значение коэффициента теплопередачи выражается количеством теплоты, проходящей через единицу поверхности стенки в единицу времени от горячего к холодному теплоносителю при разности температур между ними 1° .

Значение k всегда меньше наименьшего α .

Величина, обратная коэффициенту теплопередачи, называется *общим термическим сопротивлением* через однослойную плоскую стенку:

$$R = \frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}, \quad (\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}, \quad (11.7)$$

где $1/\alpha_1$ и $1/\alpha_2$ – внешние термические сопротивления; δ/λ – внутреннее термическое сопротивление стенки.

В случае передачи теплоты через многослойную плоскую стенку плотность теплового потока будет:

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad \text{Вт/м}^2, \quad (11.8)$$

где $\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}$ – сумма термических сопротивлений всех слоев стенки.

Коэффициент теплопередачи через многослойную плоскую стенку:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad \text{Вт/м}^2. \quad (11.9)$$

При передаче тепла через хорошо проводящие теплоту тонкие металлические стенки тепловым сопротивлением стенок можно пренебречь, и тогда уравнение (11.9) примет вид:

$$k = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}, \quad \text{Вт/м}^2. \quad (11.10)$$

В данной работе экспериментально определяется коэффициент теплопередачи горизонтального теплообменника, используя метод теплового баланса.

Основным расчетным уравнением теплообменников является уравнение теплопередачи:

$$Q = kF\Delta t_{\text{cp}}, \quad \text{Вт}, \quad (11.11)$$

где Q – количество теплоты, передаваемое от горячей к холодной среде; F – площадь, через которую передается теплота, м^2 ; Δt_{cp} – средняя разность температур (средний температурный напор) между горячей и холодной средой, °C .

Величина Q определяется из уравнения теплового баланса, которое показывает, что при отсутствии тепловых потерь количество теплоты, отдаваемое горячей средой, равно количеству теплоты, воспринимаемому холодной средой:

$$Q = M_{\Gamma} c_{\Gamma} (t_{\Gamma}^{\text{ВХ}} - t_{\Gamma}^{\text{ВЫХ}}) = M_{\text{X}} c_{\text{X}} (t_{\text{X}}^{\text{ВЫХ}} - t_{\text{X}}^{\text{ВХ}}), \quad (11.12)$$

где M – массовый расход среды, кг/с; c – средняя массовая теплоемкость, Дж/(кг · °С) (для воды $c = 4190$ Дж/(кг · °С)); $\Delta t_{\Gamma} = t_{\Gamma}^{\text{ВХ}} - t_{\Gamma}^{\text{ВЫХ}}$ – падение температуры греющей среды, °С; $\Delta t_{\text{X}} = t_{\text{X}}^{\text{ВЫХ}} - t_{\text{X}}^{\text{ВХ}}$ – повышение температуры нагреваемой среды, °С.

Водяные эквиваленты: $W_{\Gamma} = M_{\Gamma} c_{\Gamma}$, $W_{\text{X}} = M_{\text{X}} c_{\text{X}}$, тогда $Q = W_{\Gamma} \Delta t_{\Gamma} = W_{\text{X}} \Delta t_{\text{X}}$.

Изменение температур в теплообменнике больше у той среды, водяной эквивалент которой меньше.

Средний температурный напор между средами определяется по зависимости

$$\Delta t_{\text{cp}} = (\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}) / \ln(\Delta t_{\text{б}} / \Delta t_{\text{м}}), \quad (11.13)$$

где $\Delta t_{\text{б}}$ – большая разность температур между холодной и горячей средой; $\Delta t_{\text{м}}$ – меньшая разность температур.

$$\text{Если } \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}} < 1,7, \text{ то } \Delta t_{\text{cp}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} + \Delta t_{\text{м}}}{2}.$$

На рис. 11.2 показана графическая зависимость температур теплоносителей по длине теплообменного аппарата.

Описание экспериментальной установки

Опытный теплообменник является поверхностным рекуперативным гладкотрубным аппаратом типа «труба в трубе». Конструктивно представляет две стальные трубы, размещенные коаксиально одна в другой. Материальное исполнение труб – нержавеющая сталь. Теплоотдающая длина малой трубы $l = 500$ мм.

Площадь поверхности теплообмена:

$$F = \pi d_2 l = 3,14 \cdot 0,013 \cdot 0,5 = 2,04 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2.$$

Внутренний диаметр наружной трубы (трубы большого диаметра) $D_{\text{вн}} = 23,8$ мм, толщина ее стенки $\delta = 0,6$ мм, наружный диаметр $D_{\text{нар}} = 25$ мм. Все наружные поверхности теплообменника теплоизолированы.

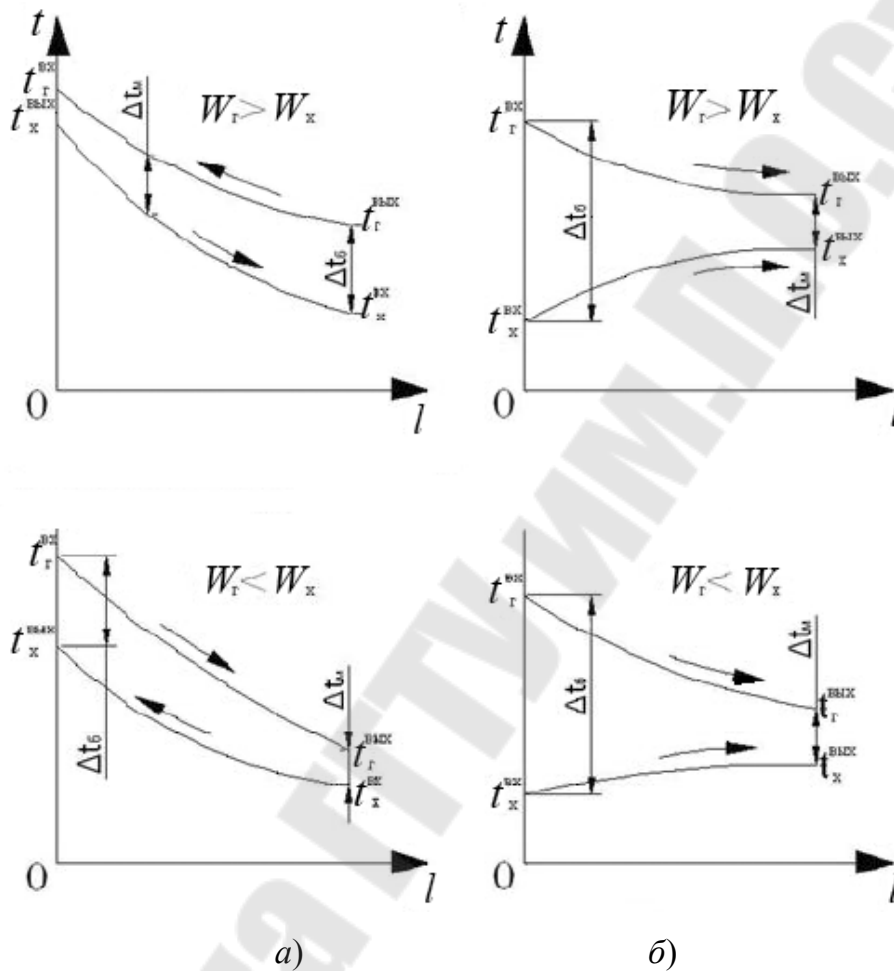


Рис. 11.2. Графическая зависимость температур теплоносителей по длине теплообменника:
 а – противоток; б – прямоток

Горячая вода движется внутри трубы малого диаметра, а нагреваемая (холодная) вода движется в кольцевом зазоре, ширина которого $c = D_{\text{вн}} - d_2 = 23,8 - 13 = 10,8$ мм.

Схема подсоединения опытного теплообменника l к замкнутой водоводяной системе стенда изображена на рис. 11.3 для случая прямоточного движения теплоносителей.

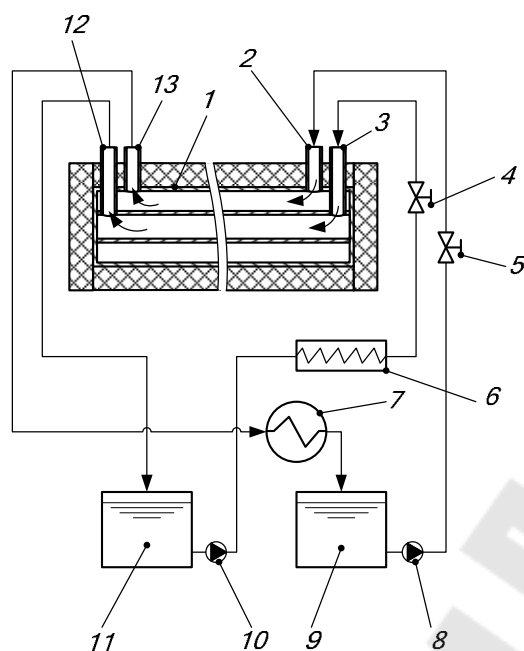


Рис. 11.3. Экспериментальная установка:

- 1 – опытный теплообменник; 2, 13 – датчики температур холодной воды; 3, 12 – датчики измерения температур горячей воды; 4 – вентиль на трубопроводе горячей воды; 5 – вентиль на трубопроводе холодной воды; 6 – электроподогреватель; 7 – трубчато-ребристый теплообменник; 8, 10 – насосы холодной и горячей воды; 9 – бак холодной воды; 11 – бак теплой воды

Теплая вода из бака 11 насосом 10 направляется в подогреватель 6 и далее при открытом вентиле 4 поступает внутрь малой трубы теплообменника, охлаждается, передавая тепло холодной воде, и затем обратно в бак 11. Изменение температуры горячей воды на входе в теплообменник осуществляется термопреобразователем 3, а на выходе из него термопреобразователем 12. Холодная вода из бака 9 насосом 8 при открытом вентиле 5 поступает в кольцевой зазор опытного теплообменника, подогревается в нем и далее проходит воздушный трубчато-ребристый теплообменник 7, в котором охлаждается, передавая тепло принудительному потоку окружающего воздуха, а затем поступает в бак 9. Температуры подогреваемой воды на входе и выходе из кольцевого зазора опытного теплообменника измеряются посредством термопреобразователей 2 и 13.

Порядок выполнения измерений

Предполагается, что опытный теплообменник уже установлен на панели стенда и к нему подсоединены шланги горячей и холодной

воды для требуемой (противоток или прямоток) схемы движения теплоносителей.

Эксперимент проводится при заданной температуре горячей воды на входе в теплообменник. Вентиль 4 на линии горячей воды полностью открыт, а вентиль 5 на линии холодной воды находится в среднем положении. После этого включаются насосы и осуществляется первая запись показаний приборов: объемный расход горячей воды V_1 , л/с; то же холодной воды V_2 , л/с; температур потоков воды t'_1 , t''_1 , t'_2 , t''_2 , °С, которые высвечиваются горячей индикацией на приборах. Далее через каждые 10–15 мин повторяется запись указанных параметров до наступления стационарного теплового режима, о достижении которого судят по установившимся показаниям температур. Запись при этом режиме является последней и по этим результатам выполняется последующая обработка результатов эксперимента. Записи заносят в табл. 11.1.

Таблица 11.1

Значения измеренных величин

Номер опыта	τ , мин	Схема движения	Показания приборов					
			V_1 , л/с	V_2 , л/с	t'_1 , °С	t''_1 , °С	t'_2 , °С	t''_2 , °С
...

Порядок операций по включению установки в работу

1. Убедиться в том, что переключатели SA1, SA2 (Насос-1), SA4 (Насос-2), SA5, SA6, SA14, SA15, SA16 установлены в положение «0» (выключены).

2. На блоке переключателей «СЕТЬ» перевести сначала тумблер QF1 в положение «вкл» (вверх), а затем тумблер QF2 также в положение «вкл» (вверх).

3. Установить индикацию стенда «L7».

4. Включить терморегулятор бака горячей воды клавишным переключателем SA6 (перевести в положение «вкл»).

5. На измерителе-регуляторе температуры горячей воды (находится возле переключателя SA6) установить температуру горячей воды по указанию преподавателя не выше 70 °С. Это выполняется следующим образом: нажатием клавиши «ПРОГ» выводится на экран значение заданной температуры, о чем свидетельствует горящая индикация у символа «Т», затем клавишами «^» или «v» задается требуемая температура, которая сохраняется в памяти прибора автоматически.

6. Включить терморегулятор бака холодной воды клавишным переключателем SA5 (перевести в положение «вкл»).

7. На измерителе-регуляторе температуры холодной воды (находится возле переключателя SA5) установить температуру холодной воды, равную температуре окружающего воздуха в порядке, как при установке температуры горячей воды.

8. Для включения насоса холодной воды перевести выключатель SA2 (Насос-1) в положение «1» («вкл»).

9. Для включения насоса горячей воды перевести выключатель SA4 (Насос-2) и тумблер SA3 (поток) перевести в нижнее положение.

10. Провести замеры температуры и объемных расходов.

Порядок операций по выключению установки

1. Переводом выключателя SA6 в положение «0» выключить терморегулятор бака горячей воды.

2. Переводом выключателя SA5 в положение «0» выключить терморегулятор бака холодной воды.

3. Перевести тумблер SA3 в среднее положение и переключатель SA4 (Насос-2) в положение «0».

4. Переключатель SA2 (Насос-1) перевести в положение «0».

5. Вывести установку из работы последовательным переводом QF2 и QF1 в положение «выкл» (нижнее).

Обработка результатов измерений

1. Определить средние значения температур $t_1 = 0,5(t_1' + t_1'')$ и $t_2 = 0,5(t_2' + t_2'')$.

По таблице физических свойств воды при атмосферном давлении по значению t_1 находят для горячей воды плотность ρ_1 , кг/м³; теплоемкость c_1 , Дж/(кг · °С); коэффициент теплопроводности λ_1 , Вт/(м · К); коэффициент кинематической вязкости ν_1 , м²/с, число Прандтля Pr_1 . Аналогично по значению t_2 из таблицы находят ρ_2 , c_2 , λ_2 , ν_2 , Pr_2 .

2. Вычисляют массовые расходы соответственно горячего и холодного теплоносителей, кг/с: $G_1 = \frac{V_1 \rho_1}{1000}$ и $G_2 = \frac{V_2 \rho_2}{1000}$.

3. Тепловой поток, переданный горячей водой, Вт:

$$Q_1 = G_1 c_1 (t_1' - t_1'').$$

4. Тепловой поток, воспринимаемый холодной водой, Вт:

$$Q_2 = G_2 c_2 (t_2'' - t_2').$$

5. Тепловые потери в окружающую среду, Вт:

$$Q_{\text{п}} = Q_1 - Q_2.$$

6. Вычисляют по формуле (11.13) средний температурный напор для принятой схемы движения теплоносителей. На рис. 11.2 схематично изображено, как определяется большая и меньшая разность температур двух сред в зависимости от схемы движения теплоносителей.

7. По формуле (11.11) находим экспериментальное значение коэффициента теплопередачи.

8. Определить скорость горячей воды и нагреваемой в соответствующем сечении опытного теплообменника, м/с:

$$\omega_1 = \frac{V_1}{1000 f_1} = \frac{4V_1}{1000\pi d_1^2};$$

$$\omega_2 = \frac{V_2}{1000 f_2} = \frac{4V_2}{1000\pi d_3^2},$$

где f_1 и f_2 – площадь поперечного сечения малой трубы и кольцевого канала соответственно, м²; $d_3 = D_{\text{вн}} - d_2$ – эквивалентный диаметр кольцевого зазора, м.

9. Число Рейнольдса греющей и нагреваемой воды:

$$\text{Re}_1 = \frac{\omega_1 d_1}{\nu_1};$$

$$\text{Re}_2 = \frac{\omega_2 d_3}{\nu_2}.$$

10. Коэффициент теплоотдачи греющей воды и нагреваемой воды в случае турбулентного режима движения определяем по уравнению М. А. Михеева, Вт/(м² · К):

$$\alpha_1 = 0,023 \frac{\lambda_1}{d_1} \text{Re}_1^{0,8} \cdot \text{Pr}_1^{0,4} \cdot \varepsilon_l;$$

$$\alpha_2 = 0,023 \frac{\lambda_2}{d_2} \text{Re}_2^{0,8} \cdot \text{Pr}_2^{0,4} \cdot \varepsilon_l,$$

где ε_l – поправочный коэффициент на длину трубы. Значение $\varepsilon_l = f(l/d, \text{Re})$ принимается по табличным данным. Если $l/d \geq 50$, то $\varepsilon_l = 1$.

При переходном режиме течения ($2200 \leq \text{Re} \leq 10^4$) греющей и нагреваемой воды коэффициент теплоотдачи α_1 или α_2 вычисляются по формуле, Вт/(м² · К):

$$\alpha = \alpha_T \eta_T,$$

где α_T – коэффициент теплоотдачи определяем по уравнению М. А. Михеева, Вт/(м² · К); η_T – поправочный коэффициент на режим движения определяется из табл. 11.2.

По формуле (11.5) определить расчетный коэффициент теплопередачи k_p и сравнить со значением, полученным по формуле (11.11). Объяснить причину расхождения.

Таблица 11.2

Значения поправочного коэффициента η_T

$\text{Re} \cdot 10^{-3}$	2,2	2,5	3	4	5	6	7	8	9	10
η_T	0,42	0,5	0,57	0,7	0,81	0,89	0,94	0,97	0,98	1,0

Контрольные вопросы

1. Механизм теплопередачи через плоскую однослойную стенку. Уравнение теплопередачи, его вывод.
2. Коэффициент теплопередачи многослойной и хорошо проводящей стенки. Термическое сопротивление.
3. Уравнение теплового баланса.
4. Как определяется средний температурный напор?
5. Показать графически изменение температуры теплоносителей по длине теплообменника при прямотоке и противотоке при различных соотношениях водяного эквивалента теплоносителей.
6. Какова зависимость между характером изменения температуры теплоносителя и водяным эквивалентом?
7. Уравнение теплового баланса при изменении фазового состояния теплоносителей.

Литература

1. Цветков, Ф. Ф. Тепломассообмен : учеб. пособие для вузов / Ф. Ф. Цветков, Б. А. Григорьев. – 3-е изд., стер. – М. : Издат. дом МЭИ, 2006.
2. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М. : Энергоатомиздат, 1981.
3. Промышленные тепломассообменные процессы и установки / А. М. Бакластов [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1986.
4. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника : справочник / под общ. ред. В. А. Григорьева и В. М. Зорина. – М. : Энергоатомиздат, 1983.
5. Теплотехнический справочник / под ред. В. Н. Юренева, П. Д. Лебедева. – М. : Энергия, 1975. – Т. 1 ; 1976. – Т. 2.
6. Нащокин, В. В. Техническая термодинамика и теплопередача / В. В. Нащокин. – М. : Высш. шк., 1981.
7. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М. : Высш. шк., 1967.
8. Техническая термодинамика : учеб. для вузов / под ред. В. И. Крутова. – М. : Высш. шк., 1991.

Содержание

<i>Лабораторная работа № 1. Определение коэффициента теплопроводности твердых тел методом пластины</i>	<i>3</i>
<i>Лабораторная работа № 2. Исследование теплопроводности твердых тел с использованием измерителя ИТЭМ-1М</i>	<i>12</i>
<i>Лабораторная работа № 3. Определение коэффициента теплопроводности сыпучих материалов методом цилиндров.....</i>	<i>16</i>
<i>Лабораторная работа № 4. Измерение теплопроводности на измерителе ИТ-λ-400.....</i>	<i>22</i>
<i>Лабораторная работа № 5. Исследование процесса нагрева тел различной конфигурации при нестационарном режиме.....</i>	<i>30</i>
<i>Лабораторная работа № 6–7. Исследование теплопередачи при естественной конвекции воздуха около горизонтального и вертикального цилиндров.....</i>	<i>38</i>
<i>Лабораторная работа № 8. Исследование теплоотдачи при вынужденном движении воздуха в трубе</i>	<i>49</i>
<i>Лабораторная работа № 9. Теплоотдача горизонтальной оребренной трубы при свободной конвекции</i>	<i>55</i>
<i>Лабораторная работа № 10. Определение коэффициента излучения электропроводящих материалов калориметрическим методом</i>	<i>59</i>
<i>Лабораторная работа № 11. Исследование теплового процесса в теплообменном аппарате типа «Труба в трубе»</i>	<i>66</i>
<i>Литература</i>	<i>76</i>

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

**Овсянник Анатолий Васильевич
Дружкин Игорь Николаевич
Степанишина Юлия Александровна**

ТЕПЛОМАССОБМЕН

**Практикум
по выполнению лабораторных работ
по одноименному курсу для студентов специальностей
1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика»
и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация
энергооборудования организаций»
дневной и заочной форм обучения**

Электронный аналог печатного издания

Редактор *Н. В. Гладкова*
Компьютерная верстка *Н. Б. Козловская*

Подписано в печать 18.05.17.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 4,65. Уч.-изд. л. 4,05.

Изд. № 97.

<http://www.gstu.by>

Издатель и полиграфическое исполнение
Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого.
Свидетельство о гос. регистрации в качестве издателя
печатных изданий за № 1/273 от 04.04.2014 г.
пр. Октября, 48, 246746, г. Гомель