

Министерство образования Республики Беларусь

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

Институт повышения квалификации
и переподготовки

Кафедра «Промышленная теплоэнергетика и экология»

ТЕПЛОМАССОБМЕН

ПРАКТИКУМ

**по выполнению лабораторных работ
по одноименной дисциплине
для слушателей специальности переподготовки
1-43 01 71 «Техническая эксплуатация
теплоэнергетических установок
и систем теплоснабжения»
заочной формы обучения**

Гомель 2020

УДК 536.24(075.8)
ББК 31.312я73
Т34

*Рекомендовано кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и экология»
ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 1 от 30.08.2019 г.)*

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

Т34 **Тепломассообмен** : практикум по выполнению лаборатор. работ по одноим. дисциплине для слушателей специальности переподготовки 1-43 01 71 «Техническая эксплуатация теплоэнергетических установок и систем теплоснабжения» заоч. формы обучения / сост. А. В. Шаповалов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2020. – 37 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: <http://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

В практикуме приведены краткие теоретические сведения, описание экспериментальных установок, порядок выполнения измерений и обработки результатов при выполнении лабораторных работ по теории теплопроводности при стационарном режиме, конвективной теплоотдаче, теплообменным аппаратам.

Для слушателей специальности переподготовки 1-43 01 71 «Техническая эксплуатация теплоэнергетических установок и систем теплоснабжения» заочной формы обучения ИПКиП.

УДК 536.24(075.8)
ББК 31.312я73

© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2020

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.

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.

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.

В природе и технике элементарные процессы распространения теплоты — теплопроводность, конвекция и тепловое излучение — очень часто происходят совместно. Теплопроводность в чистом виде большей частью имеет место лишь в твердых телах.

Конвекция теплоты всегда сопровождается теплопроводностью. 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). В любом из этих случаев необходимым условием для возникновения теплопроводности является наличие отличной от нуля разности температур между телами или различными точками сплошной среды.

Процесс теплопроводности, как и другие виды теплообмена, может иметь место только при условии, что в различных точках тела (или системы тел) температура неодинакова. В общем случае процесс передачи теплоты теплопроводностью в твердом теле сопровождается изменением температуры как в пространстве, так и во времени.

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.

Различают стационарное и нестационарное температурные поля. Когда температура изменяется с течением времени и от одной точки к другой, тогда наблюдается неустановившейся 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.

Пересечение изотермических поверхностей плоскостью дает на этой плоскости семейство изотерм. Они обладают теми же свойствами, что и изотермические поверхности, т. е. не пересекаются, не обрываются внутри тела, оканчиваются на поверхности, либо целиком располагаются внутри самого тела. На рис. 1.1 приведены изотермы, температуры которых отличаются на Δ .

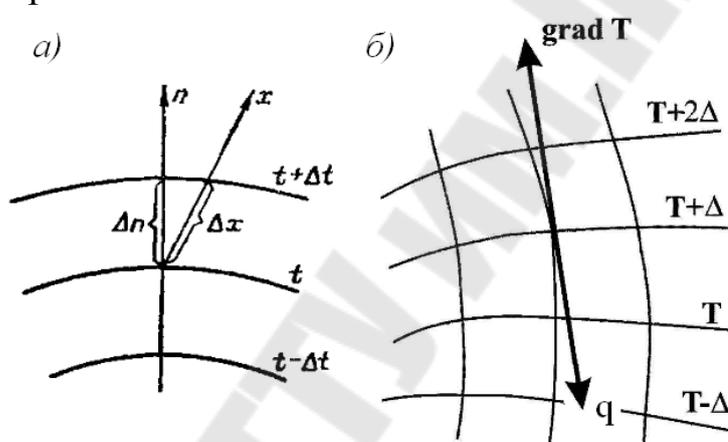


Рис. 1.1. Изотермы (а) и направления векторов градиента температуры и плотности теплового потока (б)

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.

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

где \vec{n}_0 – единичный вектор, нормальный к изотермической поверхности и направленный в сторону возрастания температуры; $\frac{\partial t}{\partial n}$ – произ-

водная температура по нормали n , величина $\frac{\partial t}{\partial n}$ в направлении убывания температуры отрицательна.

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

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

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). Коэффициент 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 раз-

ного 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 ($Q = Q_{\phi}/\phi$) 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:

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

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 образца от нагревателя подводится некоторое количество теплоты, а с противоположной стороны тепло отводится к холодильнику. Нагреватель и холодильник должны быть отрегулированы так, что бы 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).

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:

$$\lambda = q \cdot H / (T_1 - T_2). \quad (1.6)$$

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.

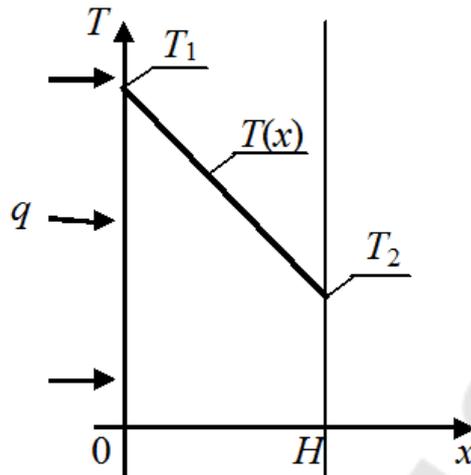


Рис. 1.2. Изменение температуры по толщине образца

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.

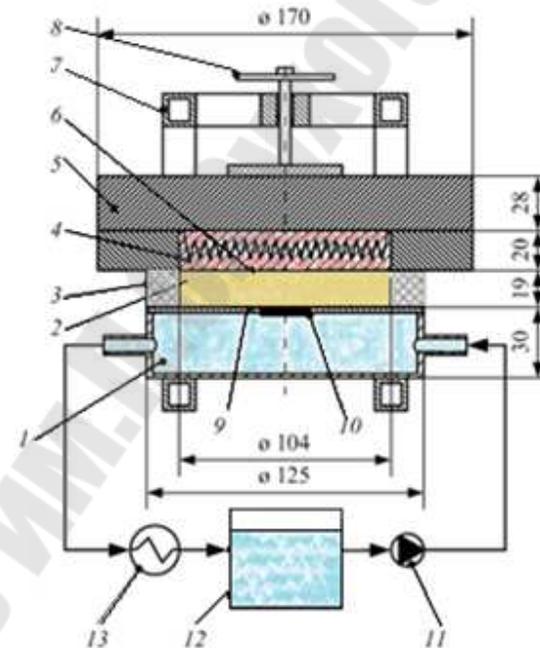
Вся система находится на опорной раме 7, позволяющей разъединять нагреватель и холодильник вращением барашка 8, а также зажимать опытный образец между ними, чтобы свести к минимуму контактное тепловое сопротивление.

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».



а)



б)

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

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 «L 1».

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:

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

Результаты измерений и расчетов по формулам (1.6) и (1.7), а также расчета точности косвенных измерений Δ_l заносятся в таблицу 1.1. В заключение проводится сравнение опытных результатов с ли-

температурными данными и объясняются причины полученных расхождений.

Таблица 1.1

Значения измеренных величин

Параметры	$H_{\text{ср}}$	T_1	T_2	q	$T_{\text{пл}}$	$L_{\text{эксп}}$	Дл	$L_{\text{табл}}$
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.
2. Способы передачи теплоты, их особенности.
3. Механизм передачи тепла теплопроводностью в металлах, диэлектриках, в жидкостях и газах.
4. Закон Фурье, объяснить знак «минус» в математическом описании закона.
5. Дать определение понятий: стационарное/нестационарное температурное поле, градиент температуры, коэффициент теплопроводности, плотность теплового потока, изотермическая поверхность.
6. Как зависит коэффициент теплопроводности металлов, твердых, жидких и газообразных сред от давления, температуры и структуры?
7. Сущность метода тонкой пластины при определении коэффициента теплопроводности.
8. Функциональная схема опытной установки.

Лабораторная работа № 2

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

Понятие конвективного теплообмена охватывает процесс теплообмена при движении жидкости или газа. При этом перенос теплоты осуществляется одновременно конвекцией и теплопроводностью.

Конвективный теплообмен осуществляется вследствие переноса теплоты движущимися потоками газа или жидкости.

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

При вынужденной конвекции движения среды возникает под действием внешних сил.

Конвективный теплообмен между потоком теплоносителя и поверхностью описывается формулой Ньютона-Рихмана.

$$Q_k = \alpha \cdot (t_{\text{п}} - t_{\text{ср}}) \cdot F, \quad (2.1)$$

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:

$$\text{Nu} = c \cdot (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^n. \quad (2.2)$$

Критериальное уравнение для вынужденной конвекции имеет вид:

$$\text{Nu} = A \cdot \text{Re}^m \cdot \text{Pr}^k, \quad (2.3)$$

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

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

$$\text{Gr} = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot l^3}{\nu^2}, \quad (2.4)$$

где $\text{Gr} = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot l^3}{\nu^2}$ – ускорение свободного падения, м/с^2 ; $\beta = 1/T$ – коэффициент линейного расширения, $1/\text{К}$; $\Delta t = t_{\text{п}} - t_{\text{с}}$ – температурный напор, $^{\circ}\text{С}$; l – определяющий размер (диаметр в случае горизонтальной трубы, длина в случае вертикальной трубы), м ; ν – кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$.

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

$$\text{Re} = \frac{\omega \cdot l}{\nu}, \quad (2.5)$$

где ω – скорость среды, м/с .

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

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{a}, \quad (2.6)$$

где a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$.

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

$$\text{Nu} = \frac{\alpha_{\text{к}} \cdot l}{\lambda}, \quad (2.7)$$

где λ – коэффициент теплопроводности среды, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{С})$.

Критериальные уравнения с числовыми значениями коэффициентов показателей степени для различных задач можно найти в справочниках. Для примера проведем критериальные уравнения теплоотдачи при следующих условиях:

1. При поперечном обтекании одиночной трубы потоком газа при $10^3 < Re < 2 \cdot 10^5$:

$$Nu = 0,25 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{0,38}. \quad (2.8)$$

2. При продольном обтекании трубы $Re > 5 \cdot 10^5$:

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4}. \quad (2.9)$$

3. Теплоотдача труб при свободной конвекции при значениях $10^3 < Gr \cdot Pr < 10^8$:

$$Nu = 0,5(Gr \cdot Pr)^{0,25}. \quad (2.10)$$

4. Теплоотдача вертикальных поверхностей (пластины, трубы) при $10^3 < Gr \cdot Pr < 10^9$:

$$Nu = 0,75(Gr \cdot Pr)^{0,25}. \quad (2.11)$$

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:

$$Q = Q_k + Q_l. \quad (2.12)$$

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

$$Q_l = \varepsilon \cdot c_0 \cdot \left[\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right] \cdot F, \quad (2.13)$$

где ε – степень черноты теплоотдающей поверхности; $c_0 = 5,67$ Вт/(м²·К⁴) – коэффициент излучения абсолютно черного тела; $T_n = 273,15 + t_n$, $T_c = 273,15 + t_c$ – абсолютная температура поверхности и движущейся среды, К.

Количество теплоты отводимой конвекцией Q_k , Вт определяется из выражения:

$$Q_k = Q - Q_l, \quad (2.14)$$

где Q – подводимая мощность, Вт.

Для жидкостей $Q_l = 0$.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м²·°С):

$$\alpha_k = \frac{Q_k}{F \cdot (t_n - t_c)}. \quad (2.15)$$

Следовательно, для определения значения α_k 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. 2.1) представляет отрезок стальной трубы длиной $l = 475$ мм наружного диаметра $d = 34$ 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 $t_{ст}$ трубы.

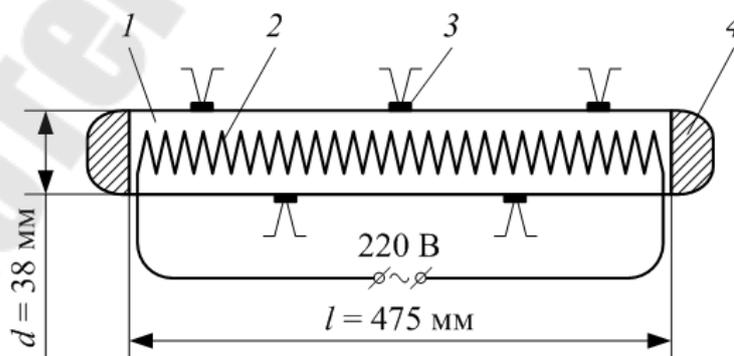


Рис. 2.1. Опытная горизонтальная труба

Схема подсоединения опытной трубы к измерительной аппаратуре изображена на рис. 2.2. Провода термопреобразователей и элект-

тронагревателя собраны в единый жгут, помещенный в изоляционный шланг 5 с разъемным штекером 6, который вставляется в соответствующее гнездо на панели 7 стенда. Пробы на стенде показывают температуру стенки $T_{ст}$, °С; температура окружающего воздуха $T_{в}$, °С и тепловой поток Q , Вт (подведенную электрическую мощность N , Вт).

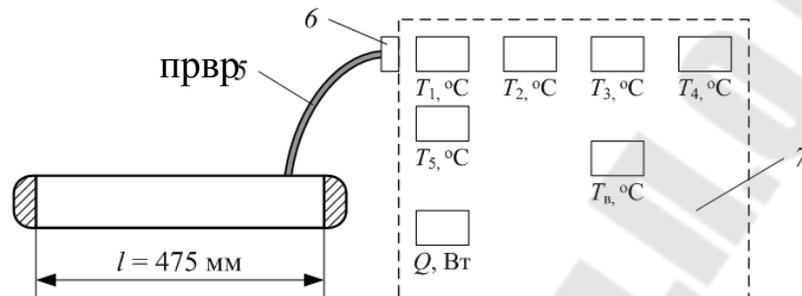


Рис 2.2. Схема присоединения опытной трубы к приборному щиту

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 таблицу 2.1.

Таблица 2.1

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-м режиме задают новые значения Q поворотом ручки РН1 и повторяют опыт во II-ом режиме аналогично той же последовательности выполнения операций I-го режима. Затем выполняют опыт в III-м 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 «L 3».
4. Регулятором SA14 и SA15 устанавливают требуемую мощность электронагревателя по заданию преподавателя.
5. По достижению стационарного режима записывают результаты измерения.

Порядок операций по выключении 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 b_k , полученные расчетным и экспериментальным путем. Для выполнения части I необходимо заполнить таблицу 2.1.

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 таблице 2.3.

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:

$$T_{\text{ст}} = T_{\text{п}} = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_4}{5}. \quad (2.16)$$

$$T_{\text{в}} = T_{\text{с}} = t_{\text{в}} + 273,15. \quad (2.17)$$

2. Вычислить по формуле (2.13) лучистую составляющую $Q_{\text{л}}$ теплового потока, принимая для никелированной трубы $\varepsilon = 0,11$, а теплоотдающая поверхность $F = \pi \cdot d \cdot l$, м².

3. По формуле (2.14) определить величину теплового потока, переданного свободной конвекцией воздуху, а далее по формуле (2.15) вычисляем конвективный коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\text{кон}}$.

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 (2.2) выбирается число подобия Грасгоффа, определяемое по формуле (2.4), и число Прандтля, определяемое по формуле (2.6).

При определении значения чисел подобия принимаем:

- коэффициент температурного расширения $\nu = 1/T_{\text{в}}$;
- при горизонтальном расположении опытной трубы $l = d$, при вертикальном расположении $l = h$;
- значения l, n, a и числа Pr выбираются из таблиц теплофизических свойств воздуха при атмосферном давлении 0,1 МПа (см. табл. 6.2) от характерной для каждого теплового режима I, II, III средней температуры пограничного слоя воздуха, °С:

$$t_{\text{т}} = 0,5(t_{\text{ст}} + t_{\text{в}}). \quad (2.18)$$

5. Вычислять для каждого режима число Релея:

$$Ra = Gr \cdot Pr. \quad (2.19)$$

Определить значения коэффициентов C и n для горизонтальной/вертикальной ориентации опытной трубы по таблице 2.3.

6. По уравнению (2.2) для каждого теплового режима при соответствующих ему $Gr \cdot Pr$ определить расчетное среднее значение

Nu_p , которое сравнить с опытным (экспериментальным) значением $Nu_{оп}$ по (2.7).

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

7. Определить расчетное значение коэффициента теплоотдачи $b_{кр}$, выразив его из соотношения (2.7) при известном Nu_p и характерном линейном размере l .

8. 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:

$$\lg Nu = \lg c + n \cdot \lg (Gr \cdot Pr), \quad (2.20)$$

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

2. Показатель степени n определяется как показано на рис. 2.3, а искомый коэффициент определяется из соотношения:

$$c = \frac{Nu_{оп}}{(Gr \cdot Pr)^n}, \quad (2.21)$$

Таблица 2.2

Теплофизические свойства воздуха при $p_{атм} = 0,1$ МПа

$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda \cdot 10^2, \frac{\text{Вт}}{(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})}$	$\nu \cdot 10^6, \frac{\text{м}^2/\text{с}}$	Pr	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})}$
0	2,44	13,28	0,707	1,293	1,005
10	2,51	14,16	0,705	1,247	1,005
20	2,59	15,06	0,703	1,205	1,005
30	2,67	16,00	0,701	1,165	1,005
40	2,76	16,96	0,699	1,128	1,005
50	2,83	17,96	0,698	1,093	1,005
60	2,90	18,97	0,696	1,060	1,005
70	2,96	20,02	0,694	1,029	1,009
80	3,05	21,09	0,692	1,000	1,009
90	3,13	22,10	0,69	0,972	1,009
100	3,21	23,13	0,688	0,946	1,009

Таблица 2.3

Значения коэффициентов C, n в уравнении (2.2) для горизонтальной/вертикальной трубы

Горизонтальная труба	Gr·Pr	c	n	Вертикальная труба	Gr·Pr	c	n
	$1 \cdot 10^{-3} \div 5 \cdot 10^2$	1,18	1/8		$10^3 \div 10^9$	0,76	0,25
$1 \cdot 10^2 \div 5 \cdot 10^7$	0,54	1/4	$>10^9$	0,15	0,33		
$1 \cdot 10^7 \div 5 \cdot 10^{13}$	0,135	1/3					

ЧАСТЬ III

1. Определить средний коэффициент теплоотдачи α к воздуху:

$$\alpha = \frac{Q}{F \cdot (t_{\text{п}} - t_{\text{с}})} \quad (2.22)$$

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

$$\alpha_{\text{л}} = \alpha - \alpha_{\text{к оп}}, \quad (2.23)$$

Сравнение между собой $\alpha_{\text{к оп}}$ 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 таблицу 6.4.

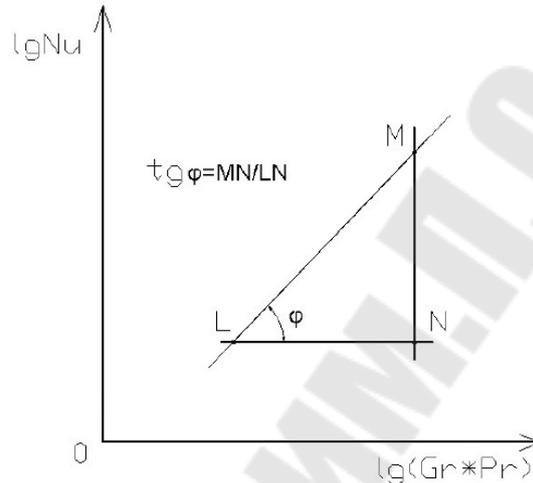


Рис. 2.3. Определение показателя степени n

Таблица 2.4

Опытные и расчетные данные при свободной конвекции воздуха

№ режима	$Q_{\text{л}}, \text{Вт}$	$Q_{\text{к}}, \text{Вт}$	$(t_{\text{п}} - t_{\text{с}}), \text{°C}$	$\text{Gr} \cdot \text{Pr}$	$\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$			$\text{Nu}_{\text{оп}}$	$\text{Nu}_{\text{р}}$	$\frac{\alpha_{\text{л}}}{\alpha_{\text{к}}}$	$\frac{\alpha_{\text{л}}}{\alpha}$
					$\bar{b}_{\text{к}}$	$\bar{b}_{\text{л}}$	\bar{b}				
I											
II											
III											

Анализ полученных результатов

Результаты расчетов представить в виде таблицы 2.5.

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 2.5

**Исследование теплопередачи при естественной конвекции
воздуха около _____ цилиндра**

(горизонтального/вертикального)

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

Окончание таблицы 2.5

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

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 её 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 № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО 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 рисунке 3.1.

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

$$q = \alpha_1 \cdot (t_1 - t'_{ст}), \text{ Вт/м}^2. \quad (3.1)$$

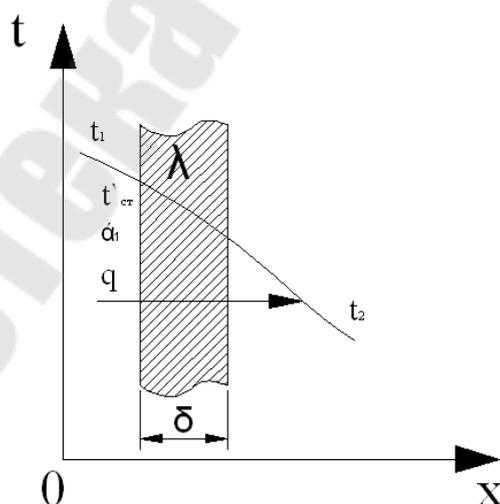


Рис. 3.1. Плоская однослойная стенка

Тепловой поток, переданный теплопроводностью через плоскую стенку, определяется уравнением:

$$q = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (t'_{\text{ст}} - t''_{\text{ст}}), \text{ Вт/м}^2. \quad (3.2)$$

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

$$q = \alpha_2 \cdot (t''_{\text{ст}} - t_2), \text{ Вт/м}^2. \quad (3.3)$$

Величины q в уравнениях (3.1)–(3.3) одинаковы, так как сколько теплоты воспринимает стенка при стационарном режиме, столько же она и отдает. Решая уравнения (3.1)–(3.3) относительно q получим:

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \text{ Вт/м}^2. \quad (3.4)$$

В уравнении (3.4) 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*:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}). \quad (3.5)$$

Тогда

$$q = k \cdot (t_1 - t_2), \text{ Вт/м}^2. \quad (3.6)$$

Полученное уравнение (3.6) 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:

$$R = \frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}, (\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}, \quad (3.7)$$

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:

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}, \text{ Вт/м}^2, \quad (3.8)$$

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

Коэффициент теплопередачи через многослойную плоскую стенку:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}, \text{ Вт/м}^2. \quad (3.9)$$

При передаче тепла через хорошо проводящие теплоту тонкие металлические стенки тепловым сопротивлением стенок можно пренебречь, и тогда уравнение (3.9) примет вид:

$$k = \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}, \text{ Вт/м}^2. \quad (3.10)$$

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

Теплообменные аппараты бывают рекуперативные, смешительные и регенеративные. Рекуперативные теплообменники бывают прямоточные, противоточные и с перекрестным током.

Основным расчетным уравнением теплообменников является уравнение теплопередачи:

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t_{cp}, \text{ Вт}, \quad (3.11)$$

где Q – количество теплоты, передаваемое от горячей к холодной среде; F – площадь, через которую передается теплота, м²; Δt_{cp} – средняя разность температур (средний температурный напор) между горячей и холодной средой, °С.

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:

$$Q = M_{\Gamma} \cdot c_{\Gamma} \cdot (t_{\Gamma}^{\text{ВХ}} - t_{\Gamma}^{\text{ВЫХ}}) = M_{\text{X}} \cdot c_{\text{X}} \cdot (t_{\text{X}}^{\text{ВЫХ}} - t_{\text{X}}^{\text{ВХ}}), \quad (3.12)$$

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

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

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

Средний температурный напор между средами определяется по зависимости:

$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}}, \quad (3.13)$$

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

$$\text{Если } \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}} < 1,7 \text{ то } \Delta t_{\text{cp}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} + \Delta t_{\text{м}}}{2}, \quad (3.14)$$

Описание экспериментальной установки

Реализация целей работы достигается исследованием процесса теплопередачи опытного теплообменника «труба в трубе» для схем прямоточного и противоточного движения теплоносителей (рис. 3.2 и 3.3).

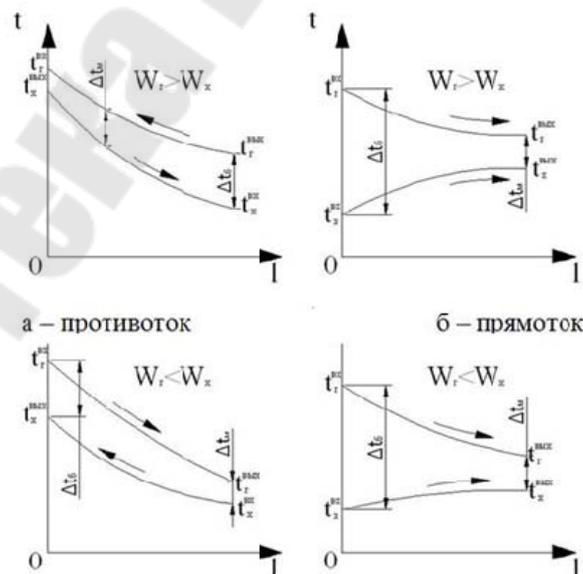


Рис. 3.2. Графическая зависимость температур теплоносителей по длине теплообменника

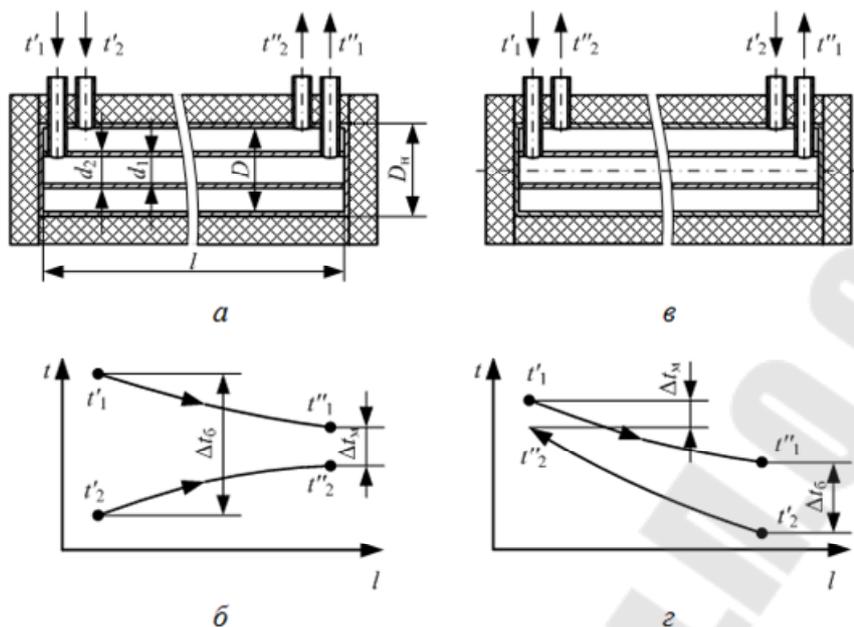


Рис. 3.3. Опытный теплообменник (а, в) и схемы распределения температур воды по длине теплообменника при прямотоке (б) и противотоке (г)

Опытный теплообменник (рис. 3.3, а) является поверхностным рекуперативным гладкотрубным аппаратом типа «труба в трубе». Конструктивно представляет две стальные труб, размещенные коаксиально одна в другой. Материальное исполнение труб – нержавеющая сталь. Теплоотдающая длина малой трубы $l = 500$ мм. Внутренний диаметр этой трубы $d_1 = 12$ мм, наружный диаметр $d_2 = 13$ мм, толщина стенки трубы $\delta = 0,5$ мм.

Площадь поверхности теплообмена:

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

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.

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. 3.4 для случая прямоточного движения теплоносителей.

Теплая вода из бака 11 насосом 10 направляется в подогреватель 6 и далее при открытом вентиле 4 поступает внутрь малой трубы теп-

лообменника, 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

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. Эта запись показаний соответствует времени $\tau = 0$ с. 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 таблицу 3.1.

Погрешность измерения температур воды $\pm 0,25$ °С, расходов воды $\pm 0,001$ л/с.

Таблица 3.1

Значения измеренных величин

№ опыта	ф, 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	
...

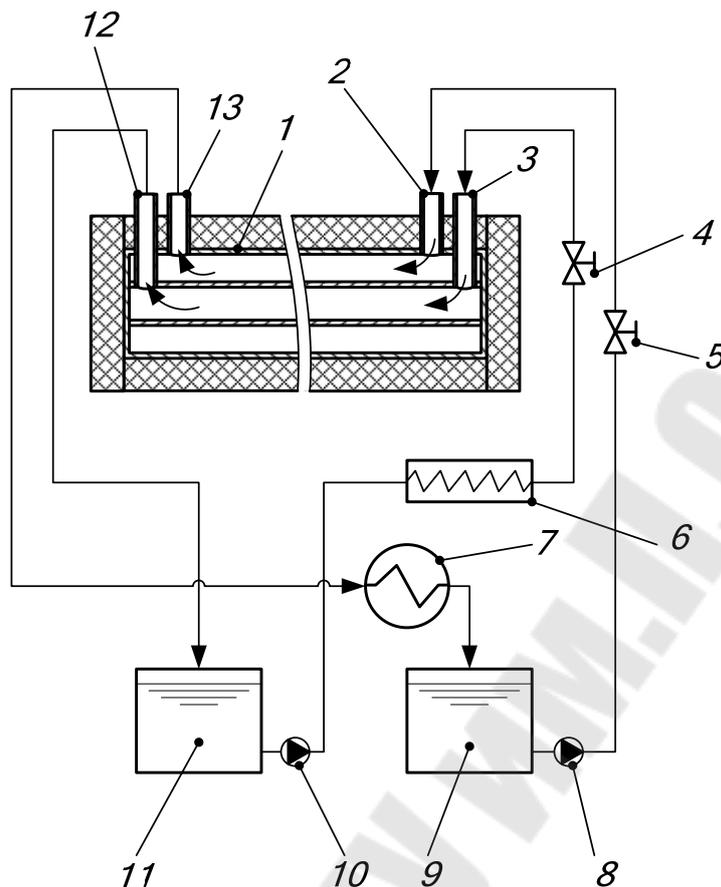


Рис. 3.4. Экспериментальная установка:

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

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 «L 7».
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 выключении 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 $t_1 = 0,5 \cdot (t_1' + t_1'')$ и $t_2 = 0,5 \cdot (t_2' + t_2'')$.

По таблице физических свойств воды при атмосферном давлении по значению t_1 находят для горячей воды плотность ρ_1 , кг/м³; теплоёмкость 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 $\rho_2, c_2, \lambda_2, \nu_2, Pr_2$.

2. Вычислить массовые расходы горячего и холодного теплоносителей, кг/с: $G_1 = \frac{V_1 \cdot c_1}{1000}$ и $G_2 = \frac{V_2 \cdot c_2}{1000}$.

3. Тепловой поток, переданный горячей водой, Вт:
 $Q_1 = G_1 \cdot c_1 \cdot (t_1' - t_1'')$.

4. Тепловой поток, воспринимаемый холодной водой, Вт:
 $Q_2 = G_2 \cdot c_2 \cdot (t_2'' - t_2')$.

5. Тепловые потери в окружающую среду, Вт:
 $Q_{\text{п}} = Q_1 - Q_2$.

6. Вычислить по формуле (3.13) средний температурный напор для принятой схемы движения теплоносителей. На рис. 3.2 схематично изображено как определяется большая и меньшая разность температур двух сред в зависимости от схемы движения теплоносителей.

7. По формуле (3.11) найти экспериментальное значение коэффициента теплопередачи.

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

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

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

где f_1 и f_2 – площадь поперечного сечения малой трубы и кольцевого канала соответственно, м^2 ; $d_3 = D_{\text{вн}} - d_2$ эквивалентный диаметр кольцевого зазора, м.

9. Число Рейнольдса для греющей и нагреваемой воды:

$$Re_1 = \frac{\omega_1 \cdot d_1}{\nu_1};$$

$$Re_2 = \frac{\omega_2 \cdot d_3}{\nu_2}.$$

10. Коэффициент теплоотдачи греющей воды и нагреваемой воды в случае турбулентного режима движения определить по уравнению М.А. Михеева, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$:

$$\alpha_1 = 0,023 \cdot \frac{\lambda_1}{d_1} \cdot Re_1^{0,8} \cdot Pr_1^{0,4} \cdot \epsilon_l;$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda_2}{d_2} \cdot \text{Re}_2^{0.8} \cdot \text{Pr}_2^{0.4} \cdot \varepsilon_l,$$

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 \bar{b}_1 или \bar{b}_2 вычисляются по формуле, Вт/(м²·К):

$$\bar{b} = \bar{b}_T \cdot z_T$$

где \bar{b}_T – коэффициент теплоотдачи определяем по уравнению М.А. Михеева, Вт/(м²·К); z_T – поправочный коэффициент на режим движения определяется из таблицы 3.2.

11. По формуле (3.5) определить расчетный коэффициент теплопередачи k_p и сравнивают со значением, полученным по формуле (3.11). Объяснить причину расхождения.

Таблица 3.2

Значения поправочного коэффициента z_T

$\text{Re} \cdot 10^{-3}$	2,2	2,5	3	4	5	6	7	8	9	10
z_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.
2. Закон Ньютона-Рихмана.
3. Уравнение теплопередачи, его вывод.
4. Коэффициент теплопередачи многослойной стенки. Термическое сопротивление.
5. Уравнение теплового баланса.
6. Как определяется средний температурный напор?
7. Показать графически изменение температуры теплоносителей по длине теплообменника при прямотоке и противотоке при различных соотношениях водяного эквивалента теплоносителей.
8. Уравнение теплового баланса при изменении фазового состояния теплоносителей.
9. Изменение температур теплоносителей в испарителе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цветков Ф.Ф. Тепломассообмен: учебное пособие для вузов/ Ф.Ф. Цветков, Б.А. Григорьев. – 3-е изд., стереот. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006.
2. Ковалев С.А, Соловьев С.Л. Испарение и конденсация в тепловых трубах. - М.: Наука, 1989.
3. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. - М.: Энергоатомиздат, 1981.
4. Бакластов А.М. и др. Промышленные тепломассообменные процессы и установки. - М: Энергоатомиздат, 1986.
5. Васильев Л.Л. Низкотемпературные тепловые трубы. - Минск: Наука и техника, 1976.
6. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника: Справочник /Под общ. ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. - М.: Энергоатомиздат, 1983.
7. Теплотехнический справочник /Под ред. В.Н. Юренева, П.Д. Лебедева. - М: Энергия, 1975. Т. 1; 1976. - Т. 2.
8. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. - М.,: Высшая школа, 1981.
9. Лыков А.В. Теория теплопроводности. - М.: Высшая школа, 1967.
10. Техническая термодинамика.: Учебник для вузов/ Под ред. В.И. Крутова. - М.: Высшая школа, 1991.

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1. Определение коэффициента теплопроводности твёрдых тел методом пластины.....	3
Лабораторная работа № 2. Исследование теплопередачи при естественной конвекции воздуха около горизонтального и вертикального цилиндров.....	13
Лабораторная работа № 3. Исследование теплового процесса в теплообменном аппарате типа «труба в труба в трубе»	26
Литература.....	36

ТЕПЛОМАССОБМЕН

**Практикум
по выполнению лабораторных работ
по одноименной дисциплине
для слушателей специальности переподготовки
1-43 01 71 «Техническая эксплуатация
теплоэнергетических установок
и систем теплоснабжения»
заочной формы обучения**

Составитель **Шаповалов Александр Валерьевич**

Подписано к размещению в электронную библиотеку
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного
учебно-методического документа 04.05.20.

Рег. № 85Е.

<http://www.gstu.by>