

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Учреждение образования
«Витебский государственный технологический университет»

ТЕПЛОМАССОБМЕН

Методические указания по выполнению лабораторных работ
для студентов специальности
1-43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования организаций»

Витебск
2020

УДК 621.1.016.4(076.5)(075.8)

Составители:

А. М. Гусаров, С. В. Жерносек, А. С. Марущак

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом УО «ВГТУ», протокол № 10 от 30.12.2019.

Тепломассообмен: методические указания по выполнению лабораторных работ / сост. А. М. Гусаров, С. В. Жерносек, А. С. Марущак. – Витебск: УО «ВГТУ», 2020. – 47 с.

В методических указаниях приведены краткие теоретические сведения, описание экспериментальных установок, порядок выполнения измерений и обработки результатов. Указания включают в себя следующие разделы: «Теплопроводность твердых тел», «Конвективный теплообмен», «Теплообмен излучением, теплопередача».

УДК 621.1.016.4(076.5)(075.8)

© УО «ВГТУ», 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ПЛАСТИНЫ	5
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ ВОЗДУХА ОКОЛО ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЦИЛИНДРА	12
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ ВОЗДУХА ОКОЛО ВЕРТИКАЛЬНОГО ЦИЛИНДРА	20
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ДВИЖЕНИИ ВОЗДУХА В ТРУБЕ	27
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛОВ КАЛОРИМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ	34
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ПРОЦЕССА В ТЕПЛООБМЕННОМ АППАРАТЕ ТИПА «ТРУБА В ТРУБЕ»	40
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	46

ВВЕДЕНИЕ

Целью изучения дисциплины «Тепломассообмен» является формирование у студентов знаний о физической природе процессов тепло- и массообмена, используемых при изучении этих процессов, теоретических, экспериментальных и расчетных методах, способах обобщения получаемых результатов.

Лабораторные работы являются одной из ключевых составляющих курса «Тепломассообмен». Выполнение лабораторных работ имеет своей целью закрепление теоретических знаний, освоение экспериментальных методик исследования процессов теплопередачи, получение опыта работы с устройствами измерения теплофизических величин, а также способствует развитию навыков планирования экспериментальных исследований.

Для успешного выполнения лабораторных работ необходимо уверенно ориентироваться в теоретическом описании исследуемых процессов, при этом осознавать то, что теоретическое описание основывается на некоторой идеализации процесса, протекающего на лабораторной установке, и уметь оценивать влияние идеализации на теоретические предсказания. Кроме того, необходимо уметь определять источники погрешностей измерения, связанные с погрешностями средств измерения, несовершенством метода измерений и с условиями измерения физических величин.

Выполнение каждой лабораторной работы состоит из трех этапов.

Первым этапом является подготовка к работе на лабораторной установке. При подготовке необходимо уяснить характер исследуемого теплофизического процесса в общих чертах и выяснить, как функционирует и управляется лабораторная установка и каков порядок проведения эксперимента.

Вторым этапом является работа на установке. Во время работы следует строго следовать порядку проведения эксперимента, в том числе соблюдать условия получения надежных измерительных данных. На данном этапе необходимо получить наглядное представление о характере протекающего теплофизического процесса.

Третьим этапом работы является обработка результатов измерений и оформление письменного отчета.

Завершается выполнение работы защитой отчета, в ходе которой студент представляет преподавателю полученные им результаты измерений, промежуточные и конечные результаты их обработки и ответы на контрольные вопросы и обсуждает их с преподавателем. В ходе защиты оцениваются знания теоретических основ лабораторной работы, корректность проведенных измерений и результатов их обработки, правильность определения погрешностей результатов, ответы на контрольные вопросы. Проводится обсуждение допущенных ошибок.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛОВ 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.

Основные теоретические сведения

Теплообмен – самопроизвольный необратимый процесс переноса теплоты в пространстве с неоднородным полем температуры. Под процессом распространения теплоты понимается обмен внутренней энергией между отдельными элементами, областями рассматриваемой среды.

Теплообмен – сложное явление, которое можно расчленить на ряд простых, принципиально отличных друг от друга процессов: **теплопроводность; конвекция; тепловое излучение.**

Перенос теплоты при непосредственном контакте более нагретых элементов тела (или среды) с менее нагретыми, осуществляемый посредством хаотического движения и взаимодействия микрочастиц (молекул, атомов, электронов, ионов), называется **теплопроводностью.**

За счет взаимодействия друг с другом быстро движущиеся микрочастицы отдают свою энергию более медленным, перенося таким образом теплоту из зоны с более высокой в зону с более низкой температурой. Явление теплопроводности наблюдается во всех телах: жидких, твердых и газообразных.

Конвекция – процесс переноса теплоты, происходящий за счет перемещения больших масс (макромасс) вещества в пространстве, поэтому наблюдается только в жидких и газообразных телах. Объемы жидкости или газа, перемещаясь из области с большей температурой в область с меньшей температурой, переносят с собой теплоту.

Тепловое излучение представляет собой процесс распространения внутренней энергии излучающего тела путем электромагнитных волн. Процесс превращения внутренней энергии вещества в энергию излучения, переноса излучения и его поглощения веществом называется теплообменом излучением.

В данной лабораторной работе объектом изучения 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.

Аналитическое исследование теплопроводности сводится к изучению пространственно-временного изменения температуры. Различают стационарное и нестационарное температурные поля. 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**.

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 $\partial t/\partial n$:

$$dQ_\tau = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} dF d\tau. \quad (1.1)$$

Знак «минус» показывает, что вектора 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 (1.1) 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.

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

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x}. \quad (1.2)$$

Значения коэффициента теплопроводности веществ находятся в пределах от тысячных долей до нескольких сотен Вт/(м·К). Оно определяется составом вещества, его агрегатным состоянием, степенью однородности.

Уравнение (1.2) 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:

$$\lambda = \left| q / \frac{\partial t}{\partial x} \right|.$$

Данное уравнение явилось основой для разработки метода определения коэффициента теплопроводности, который называется методом бесконечной тонкой пластины (или просто методом пластины). Его сущность заключается в том, что 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, 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. 1.1).

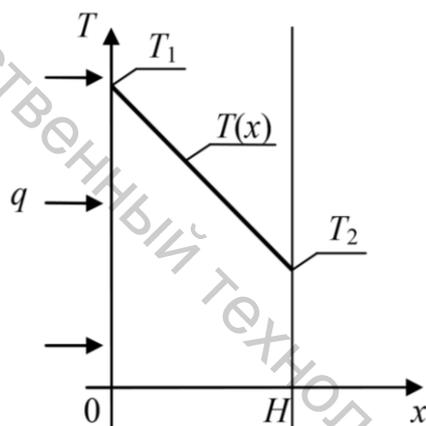


Рисунок 1.1 – Изменение температуры по толщине образца

Тогда

$$\frac{\partial t}{\partial x} = \frac{t_1 - t_2}{H},$$

где t_1, t_2 – температуры на плоских основаниях образца в градусах Цельсия, H – толщина пластины, м.

Таким образом, получаем:

$$\lambda = \frac{q \cdot H}{t_1 - t_2}. \quad (1.3)$$

Уравнение (1.3) показывает, что определение коэффициента теплопроводности может быть результатом косвенных измерений, если прямыми измерениями получены значения температур на плоских основаниях образца, его толщины и плотности теплового потока через образец в направлении, указанном на рисунке 1.1.

Порядок выполнения работы

Эксперимент проводится на лабораторном стенде с использованием модуля, изображенного на рисунках 1.2, 1.3.



Рисунок 1.2 – Модуль НТЦ-22.05.1/1 «Исследование теплопроводности материалов методом пластины»

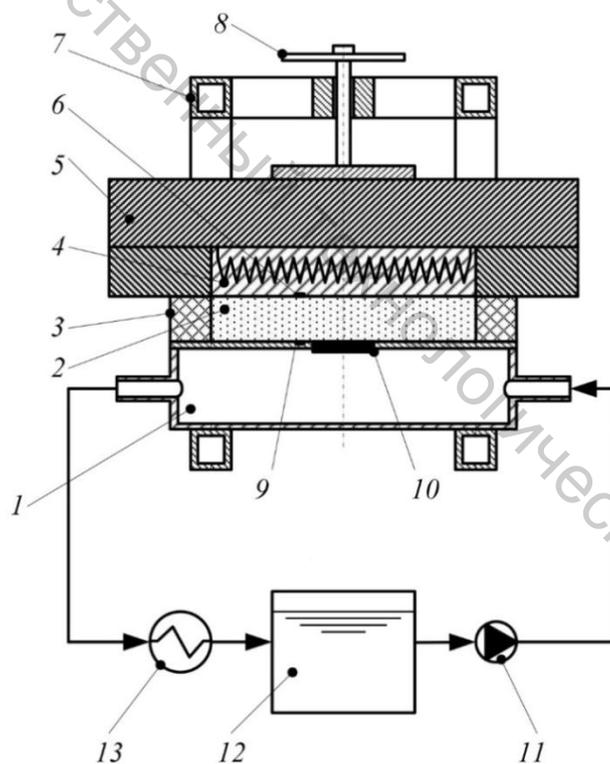


Рисунок 1.3 – Функциональная схема модуля для определения теплопроводности методом пластины:

1 – водяной охладитель; 2 – исследуемый материал; 3 – теплоизоляционное кольцо; 4 – электроннагреватель; 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

Модуль, изображённый на рисунке 1.3, содержит массивный текстолитовый диск 5, выполняющий роль теплоизолятора, в котором имеется цилиндрическая глухая полость. 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 термобатарею 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 проведения эксперимента

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 БП-06 – «выкл»; SA1 БУ-02 (Насос-1) – «выкл»; SA3 БУ-02 – «нижнее

положение»; SA2 БУ-02 (Насос-2) – «выкл»; SA5 БУ-02 – «выкл»; SA6 БУ-02 – «выкл»; RP1 БП-06 – «min»; RP2 БП-06 – «min».

3. Повернуть красную кнопку S2 БВ-03. Включить автоматический выключатель QF1 БВ-03. Нажать зелёную кнопку S1 БВ-03.

4. На ноутбуке запустить программу управления стендом PDind. Выбрать лабораторную работу 1.

5. Перевести переключатель SA1 БП-06 в положение «вкл».

6. Максимально открыть вентиль синего цвета на трубопроводе. Включить клавишный выключатель SA1 БУ-02 (Насос-1). Это приведет в работу циркуляционный насос охлаждающей воды. Установить вентилем расход $g_1 = 0,01-0,02$ л/с.

7. Рукояткой RP1 установить мощность электронагревателя по заданию преподавателя.

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

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

Порядок обработки результатов измерений

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

$$t_{пл} = 0,5 \cdot (t_1 + t_2). \quad (1.4)$$

Результаты измерений и расчётов по формулам (1.3) и (1.4) заносятся в таблицу 1.1. Полученные значения коэффициента теплопроводности сравниваются с табличными данными, и проводится оценка их расхождения:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_{экс} - \lambda_{таб}}{\lambda_{таб}} \cdot 100\%.$$

Таблица 1.1 – Значения измеренных величин и результатов расчёта

Параметры	$H,$ м	$t_1,$ °C	$t_2,$ °C	$q,$ Вт/м ²	$t_{пл},$ °C	$\lambda_{экс},$ Вт/м·°C	$\lambda_{таб},$ Вт/м·°C	$\Delta\lambda,$ %
1								
2								
3								

По результатам опытов строится график зависимости $\lambda = f(t_{пл})$.

По указанию преподавателя определяется аналитический вид зависимости коэффициента теплопроводности от температуры любым доступным способом, например, методом наименьших квадратов.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятий: теплообмен, теплопроводность, конвекция, тепловое излучение, стационарное/нестационарное температурное поле.
2. Чем отличается теплопроводность от других процессов теплопередачи?
3. Сформулируйте закон Фурье, объясните знак «минус» в математическом описании закона.
4. Какую размерность имеет коэффициент теплопроводности?
5. Дайте определение потока тепла и плотности теплового потока.
6. В чем сущность метода бесконечной тонкой пластины при определении коэффициента теплопроводности?
7. Дайте описание функциональной схемы экспериментальной установки.
8. Какие физические величины необходимо измерить в ходе выполнения работы?
9. Каким образом методика данного эксперимента обеспечивает выполнение условия стационарности теплопроводности?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ ВОЗДУХА ОКОЛО ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЦИЛИНДРА

Цель работы: изучение закономерностей свободной конвективной теплоотдачи от горизонтального цилиндра к воздуху в неограниченном пространстве с применением теории подобия; определение коэффициента конвективной теплоотдачи опытным и расчетным путем.

Основные теоретические сведения

Конвекция – процесс переноса теплоты, происходящий за счет перемещения больших масс (макромасс) вещества в пространстве, поэтому наблюдается только в жидких и газообразных телах.

Конвективный перенос может осуществляться в результате свободного или вынужденного движения теплоносителя. **Свободное движение или естественная конвекция** вызывается действием массовых (объемных) сил: гравитационной, центробежной, за счет протекания в объеме жидкости электрического тока. Чаще всего в технических устройствах естественная конвекция вызывается подъемной силой, обусловленной разностью плотностей холодных и нагретых частей жидкости. **Вынужденное движение или вынужденная конвекция** вызывается работой внешних агрегатов (насос, вентилятор). Движущая сила при этом непосредственно связана с разностью давлений на входе и выходе из канала, по которому перемещается жидкость.

Тепловые процессы между телами в различных агрегатных состояниях содержат и различные формы обмена теплом. В частности, процесс теплопередачи между жидкостью или газом и поверхностью твёрдого тела при их соприкосновении называется **конвективным теплообменом**. Этот процесс осуществляется одновременно действием теплопроводности и конвекции.

В данной лабораторной работе объектом изучения является свободная конвекция, которая вызвана только различием в плотностях нагретых и охлаждённых частей жидкости или газа в отсутствие любых внешних причин.

Процесс конвективного теплообмена между поверхностью тела и средой описывается законом Ньютона-Рихмана, который устанавливает, что количество теплоты Q_k , Вт, передаваемое конвективным теплообменом в единицу времени, прямо пропорционально площади поверхности твёрдого тела F и разности температур его поверхности t_c и окружающей среды $t_{ж}$:

$$Q_k = \alpha_k F (t_c - t_{ж}),$$

где α_k – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·К.

Коэффициент теплоотдачи характеризует интенсивность теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой. Он учитывает факторы, которые влияют на процесс конвективного теплообмена. В наиболее общем случае коэффициент теплоотдачи α зависит от формы и размеров тела, режима

движения, скорости и температуры жидкости (газа), ее физических параметров:

$$\alpha_k = f(\Phi, l_0, w_0, \Theta, \lambda_{ж}, a_{ж}, c_p, \rho_{ж}, \nu_{ж}, \beta), \quad (2.1)$$

где Φ – параметр формы тела; l_0 – параметр размера и положения поверхности тела, м; w_0 – параметр скорости среды и режима движения жидкости, м/с; $\Theta = t_c - t_{ж}$ – температурный напор; $\lambda_{ж}$ – коэффициент теплопроводности среды, Вт/(м·К); $a_{ж}$ – коэффициент температуропроводности среды, м²/с; c_p – изобарная удельная теплоёмкость среды, Дж/(кг·К); $\rho_{ж}$ – плотность среды, кг/м³; $\nu_{ж}$ – коэффициент кинематической вязкости среды, м²/с; β – температурный коэффициент объёмного расширения среды, К⁻¹.

Зависимость (2.1) имеет очень сложный вид и для её определения невозможно дать общую формулу. Это значит, что каждый конкретный случай должен служить самостоятельным объектом изучения, иногда только экспериментальным методом. Наиболее простым для исследования является случай симметричных тел.

Для аналитического метода исследования конвективного теплообмена нужно решить систему дифференциальных уравнений, состоящую из уравнения энергии, уравнения движения, уравнения сплошности, уравнения теплоотдачи. Их решение – сложная и трудоемкая задача, требующая специальных методов. В частности, теория подобия позволяет представить решение уравнения (2.1) в так называемой критериальной форме, т. е. в выражении функциональной зависимости друг от друга нескольких критериев:

$$Nu = f_1(\Phi, Re, Gr, Pr),$$

где $Nu = \frac{\alpha_k l_0}{\lambda_{ж}}$ – критерий Нуссельта, безразмерный коэффициент теплоотдачи,

характеризует теплообмен между поверхностью стенки и жидкостью (газом);

$Re = \frac{w_0 l_0}{\nu_{ж}}$ – критерий Рейнольдса, характеризует отношение сил инерции к

силам вязкостного трения и определяет характер течения жидкости (газа);

$Gr = \beta \frac{g l_0^3}{\nu_{ж}^2} \Theta$ – критерий Грасгофа, отношение подъемной силы, возникающей

вследствие разности плотностей, к силам вязкостного трения; $Pr = \frac{\nu_{ж}}{a_{ж}}$ –

критерий Прандтля, характеризует физические свойства жидкости (газа).

В случае свободной конвекции $w_0 = 0$, тогда:

$$Nu = f_2(\Phi, Gr, Pr).$$

Вид этой функциональной зависимости необходимо отыскивать для каждого конкретного случая конвективного теплообмена. В частности, как установлено академиком М. А. Михеевым, свободная конвекция от

горизонтальной трубы диаметром d , находящейся в неограниченном пространстве сухого воздуха, описывается уравнением:

$$Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n. \quad (2.2)$$

Выражения критериев, приведенных выше, содержат различные характеристики среды, в которой происходит конвективный теплообмен, в том числе и коэффициент теплоотдачи α . Это позволяет произвести проверку выполнимости уравнения (2.2), если α будет определено или прямыми измерениями или косвенными – из некоторого другого соотношения.

Таким соотношением является закон Ньютона-Рихмана, из которого следует, что:

$$\alpha_k = \frac{Q_k}{(t_c - t_{ж}) \cdot F}. \quad (2.3)$$

Переменные правой части уравнения легко определяются экспериментально. Следовательно, экспериментальная установка должна содержать цилиндр, способный нагреваться, и возможности для определения мощности нагревателя и температуры поверхности цилиндра. Планируя проведение эксперимента, учтем, что один из участников конвективного теплообмена (твердое тело) является еще и источником теплового излучения $Q_{л}$. Это значит, что мощность нагревателя цилиндра в стационарном режиме (когда температура поверхности цилиндра не изменяется со временем) расходуется на конвекцию и на излучение:

$$Q = Q_k + Q_{л} \quad \text{или} \quad Q_k = Q - Q_{л}. \quad (2.4)$$

Величина $Q_{л}$ определяется из уравнения Стефана-Больцмана:

$$Q_{л} = \varepsilon \cdot c_0 \cdot F \left[\left(\frac{T_c}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{ж}}{100} \right)^4 \right], \quad (2.5)$$

где ε – степень черноты поверхности тела; $c_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела; T_c – абсолютная температура поверхности цилиндра, К; $T_{ж}$ – абсолютная температура среды помещения, в котором проводится опыт, К; F – площадь поверхности цилиндра, м^2 .

Порядок выполнения работы

Эксперимент проводится на лабораторном стенде с использованием модуля, изображенного на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Модуль НТЦ-22.05.1/3 «Исследование теплопередачи при естественной конвекции воздуха около горизонтального цилиндра»

Модуль, изображённый на рисунке 2.2, представляет собой отрезок стальной трубы длиной $l = 475$ мм наружного диаметра $d = 34$ мм.

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 внешней поверхности трубы.

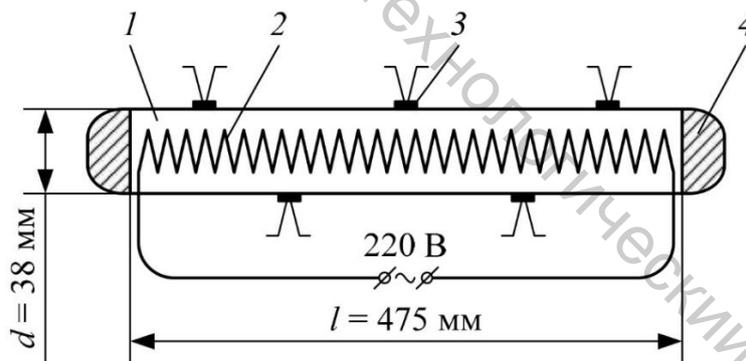


Рисунок 2.2 – Схематический чертеж экспериментального модуля

Сигналы датчиков регистрируются приборами лабораторного стенда, которые показывают локальные температуры поверхности цилиндра; температуру окружающего воздуха и тепловой поток (подведенную электрическую мощность).

Сразу после включения нагревателя происходят процессы нагрева цилиндра и теплообмена с окружающей средой, а спустя некоторый промежуток времени после начала нагревания цилиндра температура его поверхности перестанет изменяться – наступит стационарный режим. Все подводимое к цилиндру тепло будет передаваться воздуху путем конвекции и лучеиспускания. Именно этими двумя процессами при заданной мощности

нагрева и будет определяться температура поверхности цилиндра. Знание значений температур среды и поверхности цилиндра, а также мощности нагревателя позволит провести анализ процесса теплообмена с использованием вышеприведенных соотношений.

Порядок проведения эксперимента

1. Установить Модуль НТЦ-22.05.1/3 «Исследование теплопередачи при естественной конвекции воздуха около горизонтального цилиндра» на перфорированную панель и закрепить поворотом крепежных рукояток во встречном направлении на четверть оборота. Подключить кабель модуля к разъему X1 на панели стенда.

2. Убедиться в том, что переключатели установлены в положения: SA1 БП-06 – «выкл»; SA1 БУ-02 (Насос-1) – «выкл»; SA3 БУ-02 – «нижнее положение»; SA2 БУ-02 (Насос-2) – «выкл»; SA5 БУ-02 – «выкл»; SA6 БУ-02 – «выкл»; RP1 БП-06 – «min»; RP2 БП-06 – «min».

3. Повернуть красную кнопку S2 БВ-03. Включить автоматический выключатель QF1 БВ-03. Нажать зелёную кнопку S1 БВ-03.

4. На ноутбуке запустить программу управления стендом PDind. Выбрать лабораторную работу 2.

5. Регулятором PR1 БП-06 установить требуемую мощность электронагревателя по заданию преподавателя.

6. Наблюдать за значениями температур t_1, t_2, t_3, t_4, t_5 и по достижению их неизменности во времени (на протяжении 2–3 минут) считать, что наступил стационарный тепловой режим. Стационарные значения локальных температур и температуры воздуха, а также теплового потока Q , занести в таблицу 2.1.

7. По завершении опыта на заданном режиме установить новые значения Q поворотом ручки PR1 БП-06 и повторить опыт несколько раз по указанию преподавателя.

8. После выполнения всех заданий преподавателя регулятором PR1 БП-06 установить мощность электронагревателя на нулевое значение.

Таблица 2.1 – Результаты прямых измерений

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

Порядок обработки результатов измерений

1. Определить абсолютную среднюю температуру поверхности стенки цилиндра и среды (воздух):

$$T_c = \frac{(t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5)}{5} + 273,15; \quad T_{ж} = t_{ж} + 273,15.$$

2. Вычислить по формуле (2.5) лучистую составляющую $Q_{л}$ теплового потока, принимая для никелированной трубы $\varepsilon = 0,11$, а теплоотдающая поверхность $F = \pi dl$, m^2 .

3. По формуле (2.4) определить величину теплового потока, переданного свободной конвекцией воздуху, а далее по формуле (2.3) вычисляем конвективный коэффициент теплоотдачи α_k .

4. Провести расчеты значения коэффициента теплоотдачи α_k для каждого значения мощности нагревателя на основе соотношений теории подобия. Для этого в каждом случае:

а) определить число Грасгофа: $Gr = \beta \frac{g l_0^3}{\nu_{ж}^2} \vartheta$, где l_0 – определяющий

размер, в данном случае – диаметр цилиндра; ϑ – разность между средней температурой поверхности цилиндра и воздуха. Теплофизические свойства сухого воздуха приведены в таблице 2.2. Их следует выбирать для температуры, равной среднему арифметическому между температурой воздуха и средней температурой поверхности цилиндра;

Таблица 2.2 – Теплофизические свойства сухого воздуха ($p_{атм} = 0,1$ МПа)

t , °C	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	$\beta \cdot 10^3$, К ⁻¹	Pr
0	2,44	13,28	3,53	0,707
10	2,51	14,16	3,42	0,705
20	2,59	15,06	3,30	0,703
30	2,67	16,00	3,29	0,701
40	2,76	16,96	3,17	0,699
50	2,83	17,95	3,06	0,698
60	2,90	18,97	2,94	0,696
70	2,96	20,02	2,83	0,694
80	3,05	21,09	2,72	0,692
90	3,13	22,10	2,67	0,690
100	3,21	23,13	2,58	0,688

в) определить значение комплекса $(Gr \cdot Pr)$, после чего из таблицы 2.3 найти значения коэффициентов C и n в расчетном уравнении (2.2) для горизонтальной гладкой трубы;

Таблица 2.3 – Значения величины C и n в критериальном уравнении (2.2)

Режим движения	Значение комплекса	C	n
Ламинарный	$(Gr \cdot Pr) \leq 5 \cdot 10^2$	1,18	1/8
Переходный	$5 \cdot 10^2 < (Gr \cdot Pr) \leq 2 \cdot 10^7$	0,54	1/4
Турбулентный	$(Gr \cdot Pr) > 2 \cdot 10^7$	0,135	1/3

г) определить значение числа Нуссельта по формуле (2.2);

д) используя определение числа Нуссельта и полученное его значение рассчитать значение коэффициента теплоотдачи α_k .

5. Сравнить значения коэффициента теплоотдачи, полученные на основе закона Ньютона-Рихмана и теории подобия.

6. Все полученные данные представить в виде таблицы 2.4.

Таблица 2.4 – Характеристики конвективной теплоотдачи при свободной конвекции от горизонтальной трубы

Наименование величины	Расчётная формула, единицы измерения	Номер опыта		
		I	II	III
Тепловой поток, передаваемый от опытной трубы в окружающую среду				
Площадь поверхности опытной трубы				
Средняя температура наружной поверхности опытной трубы				
Средний перепад температур между наружной поверхностью опытной трубы и окружающей средой				
Тепловой поток, передаваемый от опытной трубы в окружающую среду путем излучения				
Тепловой поток, передаваемый от опытной трубы в окружающую среду путем конвекции				
Опытное значение коэффициента теплоотдачи	Закон Ньютона-Рихмана			
Число Грасгофа				
Число Прандтля				
Значение комплекса $(Gr \cdot Pr)$				
Число Нуссельта				
Расчетное значение коэффициента теплоотдачи	Определение числа Нуссельта			
Относительное расхождение между опытными и расчетными значениями коэффициента теплоотдачи				

Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятиям: конвективный теплообмен, естественная и вынужденная конвекция.
2. Сформулируйте закон Ньютона-Рихмана.
3. Дайте определение коэффициента теплоотдачи и укажите его размерность.
4. Почему для расчета конвективного теплообмена используются критериальные зависимости и какой физический смысл имеют числа подобия, используемые в данной работе?
5. Дайте описание функциональной схемы экспериментальной установки.
6. Какие физические величины необходимо измерить в ходе выполнения работы?
7. Ламинарный или турбулентный режим конвекции реализуется в условиях эксперимента?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ ВОЗДУХА ОКОЛО ВЕРТИКАЛЬНОГО ЦИЛИНДРА

Цель работы: изучение закономерностей свободной конвективной теплоотдачи от вертикального цилиндра к воздуху в неограниченном пространстве с применением теории подобия; определение коэффициента конвективной теплоотдачи опытным и расчетным путем.

Основные теоретические сведения

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** движение среды, чаще всего, 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:

$$Q_k = \alpha_k F (t_c - t_{ж}),$$

где α_k – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·К.

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.

В общем виде критериальное уравнение для свободной конвекции имеет вид:

$$Nu = f(\Phi, Gr, Pr).$$

Вид этой функциональной зависимости необходимо отыскивать для каждого конкретного случая конвективного теплообмена. Например, если нагретое тело в форме длинного цилиндра расположено горизонтально, то конвекционные потоки воздуха, будучи нагретыми в момент соприкосновения, удаляются от него и больше не нагреваются. Коэффициент теплоотдачи одинаков для любого выделенного участка длины цилиндра и для всего цилиндра в целом. Совсем иная ситуация возникает, когда цилиндр расположен

вертикально – конвекционные потоки воздуха, нагретого нижней его частью, продолжают нагреваться при своем движении вертикально вверх вдоль других частей цилиндра. Коэффициент теплоотдачи становится функцией координат, в различных по высоте частях цилиндра – он различен. Скорость движения воздуха в таких случаях может достигать критических значений, определяющих переход от ламинарного движения к турбулентному.

На рисунке 3.1 показана зависимость изменения коэффициента теплоотдачи α при свободном движении вдоль вертикальной поверхности и характер изменения режима течения конвекционного потока.

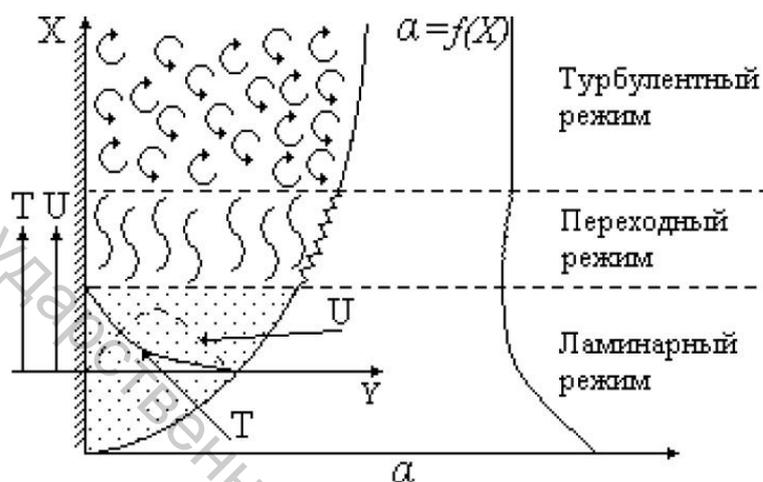


Рисунок 3.1 – Зависимость коэффициента теплоотдачи вдоль вертикальной поверхности и картина течения в пограничном слое при свободной конвекции в неограниченном пространстве

Влияние газовой среды при естественной конвекции определяется физическими параметрами газов, значения которых сильно сказываются на величине критерия Грасгофа Gr . В результате при изменении газовой среды сильно меняется комплекс $Gr \cdot Pr$, от величины которого зависит режим течения в пограничном слое, что вызывает перемещение точки перехода от ламинарного режима в турбулентный вдоль вертикальной поверхности.

Академиком М.А. Михеевым установлено, что свободная конвекция от вертикального цилиндра, находящегося в неограниченном пространстве сухого воздуха, описывается уравнениями:

а) для ламинарного течения $10^3 < (Gr \cdot Pr) < 10^9$:

$$Nu = 0,75 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25}, \quad (3.1)$$

б) для турбулентного течения $(Gr \cdot Pr) > 10^9$:

$$Nu = 0,15 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,33}. \quad (3.2)$$

Так как выражения для определения критериев подобия содержат различные характеристики среды, в которой происходит конвективный теплообмен, в том числе и коэффициент теплоотдачи α , то это позволяет произвести проверку выполнимости уравнений (3.1) и (3.2), если α будет

определен или прямыми измерениями, или косвенными – из некоторого другого соотношения.

Таким соотношением является закон Ньютона-Рихмана, из которого следует, что:

$$\alpha_k = \frac{Q_k}{(t_c - t_{ж}) \cdot F}. \quad (3.3)$$

Переменные правой части уравнения легко определяются экспериментально. Следовательно, экспериментальная установка должна содержать цилиндр, способный нагреваться, и возможности для определения мощности нагревателя и температуры поверхности цилиндра. Планируя проведение эксперимента, учтем, что один из участников конвективного теплообмена (твердое тело) является еще и источником теплового излучения $Q_{л}$. Это значит, что мощность нагревателя цилиндра в стационарном режиме (когда температура поверхности цилиндра не изменяется со временем) расходуется на конвекцию и на излучение:

$$Q = Q_k + Q_{л} \quad \text{или} \quad Q_k = Q - Q_{л}. \quad (3.4)$$

Величина $Q_{л}$ определяется из уравнения Стефана-Больцмана:

$$Q_{л} = \varepsilon \cdot c_0 \cdot F \left[\left(\frac{T_c}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{ж}}{100} \right)^4 \right], \quad (3.5)$$

где ε – степень черноты поверхности тела; $c_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела; T_c – абсолютная температура поверхности цилиндра, К; $T_{ж}$ – абсолютная температура среды помещения, в котором проводится опыт, К; F – площадь поверхности цилиндра, м^2 .

Порядок выполнения работы

Эксперимент проводится на лабораторном стенде с использованием модуля НТЦ-22.05.1/3 «Исследование теплопередачи при естественной конвекции воздуха около вертикального цилиндра», схематично изображенного на рисунке 3.2.

Модуль представляет собой отрезок стальной трубы длиной $l = 475$ мм наружного диаметра $d = 34$ мм. Снаружи поверхность трубы покрыта тонким слоем никеля. Ее площадь $F = 0,05 \text{ м}^2$.

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

внешней поверхности трубы.

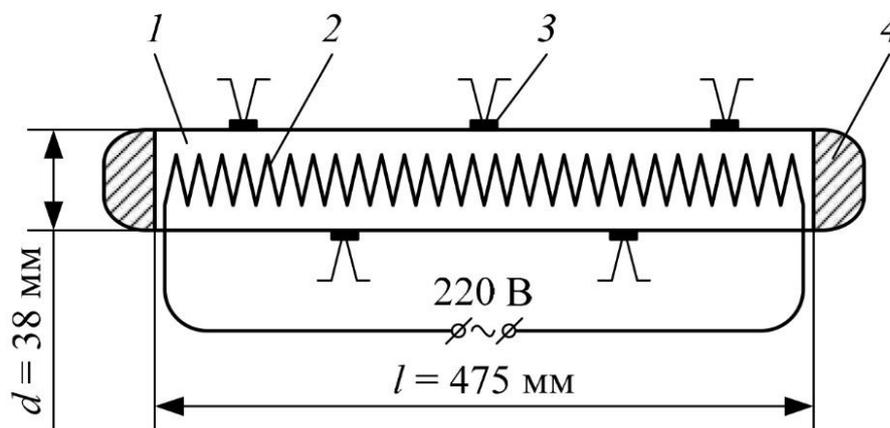


Рисунок 3.2 – Схематический чертеж экспериментального модуля

Сигналы датчиков регистрируются приборами лабораторного стенда, которые показывают локальные температуры поверхности цилиндра; температуру окружающего воздуха и тепловой поток (подведенную электрическую мощность).

Сразу после включения нагревателя происходят процессы нагрева цилиндра и теплообмена с окружающей средой, а спустя некоторый промежуток времени после начала нагревания цилиндра температура его поверхности перестанет изменяться – наступит стационарный режим. Все подводимое к цилиндру тепло будет передаваться воздуху путем конвекции и лучеиспускания. Именно этими двумя процессами при заданной мощности нагрева и будет определяться температура поверхности цилиндра. Знание значений температур среды и поверхности цилиндра, а также мощности нагревателя позволит провести анализ процесса теплообмена с использованием вышеприведенных соотношений.

Порядок проведения эксперимента

1. Установить Модуль НТЦ-22.05.1/3 «Исследование теплопередачи при естественной конвекции воздуха около вертикального цилиндра» на перфорированную панель и закрепить поворотом крепежных рукояток во встречном направлении на четверть оборота. Подключить кабель модуля к разъему X1 на панели стенда.

2. Убедиться в том, что переключатели установлены в положения: SA1 БП-06 – «выкл»; SA1 БУ-02 (Насос-1) – «выкл»; SA3 БУ-02 – «нижнее положение»; SA2 БУ-02 (Насос-2) – «выкл»; SA5 БУ-02 – «выкл»; SA6 БУ-02 – «выкл»; RP1 БП-06 – «min»; RP2 БП-06 – «min».

3. Повернуть красную кнопку S2 БВ-03. Включить автоматический выключатель QF1 БВ-03. Нажать зеленую кнопку S1 БВ-03.

4. На ноутбуке запустить программу управления стендом PDind. Выбрать лабораторную работу 3.

5. Регулятором PR1 БП-06 установить требуемую мощность электронагревателя по заданию преподавателя.

6. Наблюдать за значениями температур t_1, t_2, t_3, t_4, t_5 , и по достижению их неизменности во времени (на протяжении 2–3 минут) считать, что наступил стационарный тепловой режим. Стационарные значения локальных температур и температуры воздуха, а также теплового потока Q , занести в таблицу 3.1.

7. По завершении опыта на заданном режиме установить новые значения Q поворотом ручки PR1 БП-06 и повторить опыт несколько раз по указанию преподавателя.

8. После выполнения всех заданий преподавателя регулятором PR1 БП-06 установить мощность электронагревателя на нулевое значение.

Таблица 3.1 – Результаты прямых измерений

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

Порядок обработки результатов измерений

1. Мысленно разбить цилиндр на 5 равных частей (локальные участки), в геометрическом центре которых находятся датчики температуры.

2. Определить значение коэффициента теплоотдачи α на основе закона Ньютона-Рихмана, воспользовавшись соотношениями (3.3–3.5) для каждого значения мощности нагревателя. Принять, что для никелированной трубы $\varepsilon = 0,11$. Учесть, что в теплообмене локального участка действует только пятая часть поверхности цилиндра и пятая часть нагревателя.

3. Провести расчеты значения коэффициента теплоотдачи α_k для каждого участка цилиндра на основе соотношений теории подобия. Для этого в каждом случае:

а) определить число Грасгофа: $Gr = \beta \frac{g l_0^3}{\nu_{ж}^2} \vartheta$, где l_0 – определяющий

размер, в данном случае – пятая часть длины цилиндра; ϑ – разность между средней температурой поверхности цилиндра и воздуха. Теплофизические свойства сухого воздуха приведены в таблице 2.2. Их следует выбирать для температуры, равной среднему арифметическому между температурой воздуха и средней температурой поверхности цилиндра;

в) определить значение комплекса ($Gr \cdot Pr$), после чего сделать вывод о ламинарном либо турбулентном движении воздуха и выбрать соответствующее соотношение (3.1) или (3.2) для расчета числа Нуссельта;

г) определить значение числа Нуссельта по выбранной формуле;

д) используя определение числа Нуссельта и полученное его значение, рассчитать значение коэффициента теплоотдачи α_k .

4. Сравнить значения коэффициента теплоотдачи, полученные на основе закона Ньютона-Рихмана и теории подобия для каждого участка трубы в отдельности.

5. Все полученные данные представить в виде таблицы 3.2.

Таблица 3.2 – Характеристики конвективной теплоотдачи при свободной конвекции от вертикальной трубы

Наименование величины	Расчётная формула, единицы измерения	Номер опыта		
		I	II	III
1	2	3	4	5
Тепловой поток, передаваемый от опытной трубы в окружающую среду				
Локальный тепловой поток, передаваемый от отдельных частей опытной трубы в окружающую среду				
Площадь поверхности опытной трубы				
Площадь поверхности локального участка опытной трубы				
Температура локальных участков поверхности опытной трубы				
Перепад температур между локальными участками опытной трубы и окружающей средой				
Тепловой поток, передаваемый от локальных участков опытной трубы в окружающую среду путем излучения				
Тепловой поток, передаваемый от локальных участков опытной трубы в окружающую среду путем конвекции				
Опытное значение коэффициента теплоотдачи локальных участков	Закон Ньютона-Рихмана			

Окончание таблицы 3.2

1	2	3	4	5
Числа Грасгофа на локальных участках				
Число Прандтля				
Значение комплекса (Gr·Pr) на локальных участках				
Определение режима течения воздуха на локальных участках				
Число Нуссельта на локальных участках				
Расчетное значение коэффициента теплоотдачи локальных участков	Определение числа Нуссельта			
Относительное расхождение между опытным и расчетным значениями коэффициента теплоотдачи локальных участков				

Контрольные вопросы

1. Какой вид теплообмена исследуется в данной лабораторной работе? Назовите другой, сопутствующий вид теплообмена.
2. Запишите уравнение теплового баланса рассматриваемой системы. Как определить значения величин, составляющих баланс?
3. Запишите формулу и поясните физический смысл числа Нуссельта.
4. Запишите формулу и поясните физический смысл числа Грасгофа.
5. Запишите формулу и поясните физический смысл числа Прандтля.
6. Поясните, как влияет ориентация в пространстве теплоотдающей поверхности на выбор её характерного линейного размера.
7. Как графическим способом определяются значения коэффициента C и степени n в уравнении М.А. Михеева?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ДВИЖЕНИИ ВОЗДУХА В ТРУБЕ

Цель работы: изучение закономерностей вынужденной конвективной теплоотдачи при движении воздуха в трубе с применением теории подобия; определение коэффициента конвективной теплоотдачи опытным и расчетным путем.

Основные теоретические сведения

Конвективный теплообмен между потоком жидкости или газа и поверхностью твердого тела называется **конвективной теплоотдачей**.

Теплоотдача является сложным процессом, конкретные условия учитываются коэффициентом теплоотдачи, который зависит от большого числа факторов. В наиболее общем случае он зависит от формы и размеров тела, режима движения, скорости и температуры жидкости, ее физических параметров. По-разному протекает процесс теплоотдачи в зависимости от природы возникновения движения жидкости.

Различают две разновидности конвективной передачи теплоты – свободную (или естественную, возникающую только вследствие разности температур в различных областях жидкости или газа) и вынужденную конвекцию. Объектом изучения в данной работе является **вынужденная конвекция**, которая вызвана работой насосов, вентиляторов или других устройств, создающих разность давлений в газовой или жидкой среде. Эта разность обеспечивает перенос частиц среды между областями с разными температурами, т. е. теплообмен.

При малых скоростях движения жидкости и больших перепадах температур теплота переносится за счет как естественной, так и вынужденной конвекции. Если скорости движения велики, а температурные перепады незначительны, то влияние свободной конвекции на суммарный теплообмен также незначительно. Интенсивность теплоотдачи конвекцией зависит от характера течения жидкости в пограничном слое. При **ламинарном режиме** течения жидкости, когда линии тока параллельны теплоотдающей поверхности, интенсивность теплоотдачи невелика, слабо зависит от скорости течения жидкости и существенно зависит от теплофизических свойств теплоносителя.

При **турбулентном режиме** течения скорость в каждой точке потока пульсирует около некоторого среднего по времени значения. Вследствие этого возникает интенсивное поперечное перемешивание жидкости, что и вызывает интенсивный обмен количеством движения и теплотой между слоями с различной скоростью.

Академиком М.А. Михеевым установлено, что вынужденная конвекция в случае течения сухого воздуха в гладких трубах круглого сечения описывается следующими соотношениями:

- 1) ламинарный вязкостно-гравитационный режим течения $Re \leq 2300$:

$$Nu = 0,15 \cdot (Re \cdot Pr)^{0,33} (Gr \cdot Pr)^{0,1} \cdot \varepsilon_l, \quad (4.1)$$

где $Re = \frac{w_0 l_0}{\nu_{ж}}$ – критерий Рейнольдса, характеризует отношение сил инерции к силам вязкостного трения и определяет характер течения жидкости (газа); ε_l – коэффициент, учитывающий изменение среднего коэффициента теплоотдачи по длине трубы, и зависит от отношения длины трубы (l) к ее диаметру (d).

При $l/d \geq 50$ значение $\varepsilon_l = 1$; при $l/d < 50$ – значение коэффициента определяется по таблице 4.1;

Таблица 4.1 – Значение ε_l при вязкостно-гравитационном режиме

l/d	1	2	5	10	15	20	30	40	50
ε_l	1,90	1,70	1,44	1,28	1,18	1,13	1,05	1,02	1,00

2) турбулентный режим течения $Re \geq 10^4$:

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \varepsilon_l. \quad (4.2)$$

При $l/d \geq 50$ значение $\varepsilon_l = 1$; при $l/d < 50$ значение $\varepsilon_l \approx 1 + \frac{2}{l/d}$;

3) переходной режим течения характеризуется перемежаемостью ламинарного и турбулентного течений $2300 < Re < 10^4$. В этом случае коэффициент теплоотдачи рассчитывают по формуле:

$$Nu = K_0 \cdot Pr^{0,43} \cdot \varepsilon_l, \quad (4.3)$$

где комплекс K_0 находят по таблице 4.2 в зависимости от числа Рейнольдса; поправку ε_l рассчитывают также как при турбулентном режиме течения.

Таблица 4.2 – Зависимость комплекса K_0 от числа Рейнольдса

$Re \cdot 10^{-3}$	2,3	2,5	3,0	3,5	4	5	6	7	8	9	10
K_0	3,6	4,9	7,5	10	12,2	16,5	20	24	27	30	33

Критерии подобия в уравнениях (4.1)–(4.3) содержат различные характеристики среды, в которой происходит конвективный теплообмен, в том числе и коэффициент теплоотдачи α . Это позволяет произвести проверку выполнимости уравнений (4.1–4.3), если α будет определено из некоторого другого соотношения. Таким соотношением является закон Ньютона-Рихмана, из которого следует, что:

$$\alpha_k = \frac{Q_k}{(t_c - t_{ж}) \cdot F}. \quad (4.4)$$

Переменные правой части уравнения легко определяются экспериментально. Следовательно, экспериментальная установка должна

содержать цилиндр, по которому внешними устройствами прокачивается газ или жидкость (в нашем случае воздух). По ходу течения должен работать какой-либо нагреватель. Им может быть сама труба при прохождении по ней электрического тока, или трубчатый электронагреватель, расположенный внутри трубы, вдоль ее оси.

Порядок выполнения работы

Эксперимент проводится на лабораторном стенде с использованием модуля, изображенного на рисунке 4.1.



Рисунок 4.1 – Модуль НТЦ-22.05.1/4 «Исследование теплопередачи при вынужденном движении воздуха в трубе»

Модуль, изображённый на рисунке 4.2, представляет собой стальную трубу 4, в которой коаксиально размещен цилиндр 5 меньшего диаметра. Труба 4 теплоизолирована снаружи, а цилиндр 5 равномерно нагревается электрическим током заданной мощности. Длина цилиндра 5 $l = 470$ мм, его диаметр $d = 9,6$ мм, внутренний диаметр трубы 4 $D = 37$ мм.

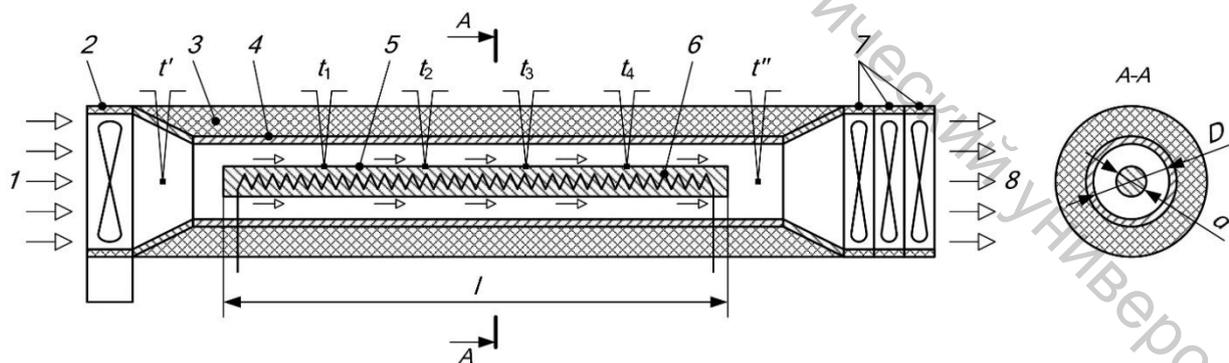


Рисунок 4.2 – Схема экспериментального модуля:

- 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 кольцевой канал; t'' – для измерения температуры воздуха на выходе кольцевого канала; t_1-t_4 – для измерения температуры поверхности по длине нагреваемого цилиндра.

Площадь поверхности теплообмена равна $F = \pi dl = 3,14 \cdot 0,0096 \cdot 0,47 = 1,42 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$. 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 прохождения 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 . Сигналы датчиков регистрируются приборами лабораторного стенда.

Сразу после включения нагревателя происходят процессы нагрева внутреннего цилиндра и теплообмена с прокачиваемым воздухом. Спустя некоторый промежуток времени после начала нагревания цилиндра температура его поверхности в различных точках перестанет изменяться со временем – наступит стационарный режим. Все подводимое к цилиндру тепло будет передаваться прокачиваемому воздуху, так как наружная труба надежно теплоизолирована. Особенностью данного стационарного состояния является то, что температура воздуха и поверхности нагревающего цилиндра не одинаковы в различных точках вдоль оси, совпадающей с направлением движения воздуха. В этих условиях для расчета температурного напора, характеризующего происходящий теплообмен, в качестве температуры среды выберем среднее арифметическое между температурами воздуха на входе в трубу и на выходе из нее, а за температуру поверхности нагревателя возьмем среднее арифметическое температур отдельных ее точек:

$$t_{\text{ж}} = \frac{(t' + t'')}{2}, \quad (4.5)$$

$$t_{\text{с}} = \frac{(t_1 + t_2 + t_3 + t_4)}{4}. \quad (4.6)$$

И, наконец, в качестве определяющей температуры для выбора табличных значений физических свойств воздуха при атмосферном давлении примем среднее арифметическое между вычисленными по формулам (4.5) и (4.6) температурами поверхности нагревателя и воздуха:

$$t_{\text{опп}} = \frac{(t_{\text{ж}} + t_{\text{с}})}{2}. \quad (4.7)$$

Знание значений температур среды и поверхности цилиндра, а также мощности нагревателя позволит провести анализ процесса вынужденного

теплообмена.

Порядок проведения эксперимента

1. Установить модуль НТЦ-22.05.1/4 «Исследование теплопередачи при вынужденном движении воздуха в трубе» (рис. 4.1) на перфорированную панель и закрепить поворотом крепежных рукояток во встречном направлении на четверть оборота. Подключить кабель модуля к разъему X1 на панели стенда.

2. Убедиться в том, что переключатели установлены в положения: SA1 БП-06 – «выкл»; SA1 БУ-02 (Насос-1) – «выкл»; SA3 БУ-02 – «нижнее положение»; SA2 БУ-02 (Насос-2) – «выкл»; SA5 БУ-02 – «выкл»; SA6 БУ-02 – «выкл»; RP1 БП-06 – «min»; RP2 БП-06 – «min».

3. Повернуть красную кнопку S2 БВ-03. Включить автоматический выключатель QF1 БВ-03. Нажать зеленую кнопку S1 БВ-03.

4. На ноутбуке запустить программу управления стендом PDind. Выбрать лабораторную работу 4.

5. Регулятором PR1 БП-06 установить требуемую мощность электронагревателя по заданию преподавателя.

6. Регулятором PR2 БП-06 установить требуемую мощность вентиляторов по заданию преподавателя.

7. 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 при этом режиме является последней, и ее заносят в таблицу 4.3. По этим данным выполняется последующая обработка результатов эксперимента.

8. По указанию преподавателя повторить опыт при других значениях мощности вентиляторов и электронагревателя.

9. После выполнения всех заданий преподавателя регуляторами PR1 БП-06 и PR2 БП-06 установить мощности на нулевое значение.

Таблица 4.3 – Результаты прямых измерений

№ опыта	$N_э$, Вт	$N_в$, Вт	τ , мин	V , л/с	Значения температур					
					t_1 , °С	t_2 , °С	t_3 , °С	t_4 , °С	t' , °С	t'' , °С

Порядок обработки результатов измерений

1. Определить среднее значение температуры воздуха и теплообменной поверхности по формулам (4.5) и (4.6).

2. По таблице 4.4 физических свойств воздуха при атмосферном давлении по значению определяющей температуры, равной среднему арифметическому между температурой воздуха и средней температурой теплообменной поверхности, формула (4.7), найти плотность, коэффициент теплопроводности, удельную массовую изобарную теплоемкость, коэффициент кинематической вязкости, число Прандтля среды.

Таблица 4.4 – Теплофизические свойства сухого воздуха ($p_{\text{атм}} = 0,1 \text{ МПа}$)

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
0	1,293	1,005	2,44	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	23,13	0,688

3. Определить массовый расход воздуха по формуле:

$$G = V \cdot \rho, \text{ кг/с.}$$

4. Тепловой поток, переданный воздуху от нагретой стенки:

$$Q_k = G \cdot c_p \cdot (t'' - t'), \text{ Вт.}$$

5. По формуле (4.4) определить опытный коэффициент теплоотдачи.

6. Определить среднюю скорость движения воздуха в кольцевом канале:

$$w = \frac{V}{f} = \frac{4V}{\pi \cdot (D^2 - d^2)}, \text{ м/с.}$$

7. Найти число Рейнольдса в соответствии с его определением:

$$\text{Re} = \frac{w d_3}{\nu},$$

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

8. По значению числа Рейнольдса установить режим течения воздуха и выбрать соответствующую формулу из (4.1)–(4.3) для расчета числа Нуссельта. Если режим течения ламинарный, то предварительно определить значение

числа Грасгофа $\text{Gr} = \beta \frac{g d_3^3}{\nu_{\text{ж}}^2} \vartheta$.

9. Определить расчетное значение коэффициента теплоотдачи.

10. Сравнить значения коэффициента теплоотдачи, полученные на основе использования закона Ньютона-Рихмана и соотношений теории подобия.

11. Все полученные данные представить в виде таблицы 4.5.

Таблица 4.5 – Характеристики конвективной теплоотдачи при вынужденном движении воздуха в трубе

Наименование величины	Расчётная формула, единицы измерения	Номер опыта		
		I	II	III
Средняя температура воздуха в трубе				
Средняя температура поверхности нагревателя				
Температурный напор				
Определяющая температура				
Массовый расход воздуха				
Тепловой поток, передаваемый воздуху от нагревателя				
Опытное значение коэффициента теплоотдачи	Закон Ньютона-Рихмана			
Значение числа Грасгофа				
Значение числа Прандтля				
Значение числа Рейнольдса				
Режим движения воздуха				
Значение числа Нуссельта				
Расчетное значение коэффициента теплоотдачи	Определение числа Нуссельта			
Относительное расхождение между опытными и расчетными значениями коэффициента теплоотдачи				

Контрольные вопросы

1. Поясните отличие процессов теплоотдачи при свободной и вынужденной конвекции.

2. В ламинарном или турбулентном режиме течения достигается большее значение коэффициента теплоотдачи? Обоснуйте ответ.

3. Запишите общий вид критериальных уравнений конвективного теплообмена.

4. Запишите формулу и поясните физический смысл числа Рейнольдса.

5. Запишите критериальные уравнения для вынужденной конвекции при различных режимах движения.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5. 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.

Основные теоретические сведения

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.

При тепловом излучении происходит двойное превращение энергии – внутренняя энергия излучающего тела переходит в энергию электромагнитного излучения и обратно, лучистая энергия, поглощаясь телом, переходит во внутреннюю. Все тела при температуре $T > 0$ К испускают электромагнитные волны.

Излучение тела, обусловленное его тепловым состоянием (степенью нагретости), называют **собственным излучением этого тела**. Поток собственного излучения обозначают $Q_{\text{соб}}$ или буквой Q без нижнего индекса. Плотность потока собственного излучения обозначают $E_{\text{соб}}$ или E и называют **лучеиспускательной способностью тела**:

$$E_{\text{соб}} = \frac{dQ_{\text{соб}}}{dF}, \text{ или } E = \frac{dQ}{dF}, \text{ Вт/м}^2,$$

где dQ – поток собственного излучения (Вт), испускаемый элементарной площадкой dF (м^2).

В величине E заключена вся энергия, излучаемая телом в диапазоне длин волн $\lambda = 0 \dots \infty$, т. е. энергия излучения всего спектра. Поток собственного излучения со всей поверхности выразится интегралом:

$$Q = \int_F E dF.$$

Если плотность потока интегрального излучения для всех элементов поверхности излучающего тела одинакова, то получим соотношение:

$$Q = EF.$$

Долю лучеиспускательной способности, заключенную в бесконечно малом спектральном диапазоне длин волн $d\lambda$, называют спектральной

плотностью потока собственного излучения или **спектральной лучеиспускательной способностью тела** и обозначают

$$E_{\lambda} = \frac{d^2 Q}{dF d\lambda} = \frac{dE}{d\lambda}, \text{ Вт/м}^3.$$

Зная функцию распределения $E_{\lambda} = f(\lambda)$, лучеиспускательную способность тела можно рассчитать, проинтегрировав эту функцию по всему спектру излучения:

$$E = \int_0^{\infty} E_{\lambda} d\lambda.$$

Поэтому лучеиспускательную способность тела также называют **интегральной плотностью потока собственного излучения**.

В данной лабораторной работе объектом изучения являются **интегральные (не спектральные) характеристики теплового излучения твёрдых тел**. В работе используется модель абсолютно черного тела (поглощает и излучает, но не отражает электромагнитную волну) и модель серого или реального тела, способного и излучать, и поглощать, и отражать.

В основе большей части расчетных соотношений лучистого теплообмена, используемых в технике, лежит **закон Стефана-Больцмана**, согласно которому полное количество энергии, излучаемое единицей поверхности абсолютно черного тела в единицу времени, пропорционально абсолютной температуре T в четвертой степени:

$$E_0 = \sigma_0 T^4,$$

где σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана, равная $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴).

Для технических расчетов закон Стефана-Больцмана записывают в виде:

$$E_0 = c_0 \left[\frac{T}{100} \right]^4,$$

где $c_0 = 10^8 \cdot \sigma_0 = 5,67$ Вт/(м²·К⁴) – коэффициент лучеиспускания 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:

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0}.$$

Степень черноты характеризует излучательную способность рассматриваемого тела по сравнению с абсолютно черным телом и зависит от состояния поверхности тела и ее температуры. Значения степени черноты ε для различных тел находится в пределах от 0 до 1.

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

$$E = \varepsilon E_0 = \varepsilon c_0 \left[\frac{T}{100} \right]^4 = c \left[\frac{T}{100} \right]^4,$$

где c – коэффициент лучеиспускания серого тела.

Для определения результирующего потока теплового излучения между телами любой формы при произвольном их расположении в пространстве может быть использовано следующее расчетное соотношение:

$$Q_{1,2} = \varepsilon_{1,2} \cdot c_0 \cdot F_{1,2} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right],$$

где T_1 и T_2 – температура «горячего» и «холодного» тела, К; $\varepsilon_{1,2}$ – приведенная степень черноты рассматриваемой системы; $F_{1,2}$ – приведенная площадь поверхности теплообмена рассматриваемой системы, м².

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:

$$\varepsilon_1 = \frac{Q_1}{c_0 \cdot F_1 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}. \quad (5.1)$$

Переменные правой части этого уравнения доступны для измерения либо непосредственно, либо косвенно. Следовательно экспериментальная установка должна содержать испытуемый объект, устройство для его нагрева, а также возможности определения температуры и переданного количества теплоты.

Порядок выполнения работы

Эксперимент проводится на лабораторном стенде с использованием модуля, изображенного на рисунках 5.1, 5.2.

Калориметрический метод определения коэффициента излучения заключается в том, что исследуемое тело погружается в калориметр, где участвует в теплообмене с другим телом. Знание энергии теплообмена и температуры излучающего тела позволяют рассчитать его коэффициент излучения. 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.



Рисунок 5.1 – Модуль НТЦ-22.05.1/6 «Определение коэффициента излучения электропроводящих материалов калориметрическим методом»

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 4, расположенными на приборной панели стенда.

Вода прокачивается через калориметр насосом. Температура воды на входе $t_{\text{вх}}$ и выходе $t_{\text{вых}}$ из калориметра измеряется датчиками температуры 3.

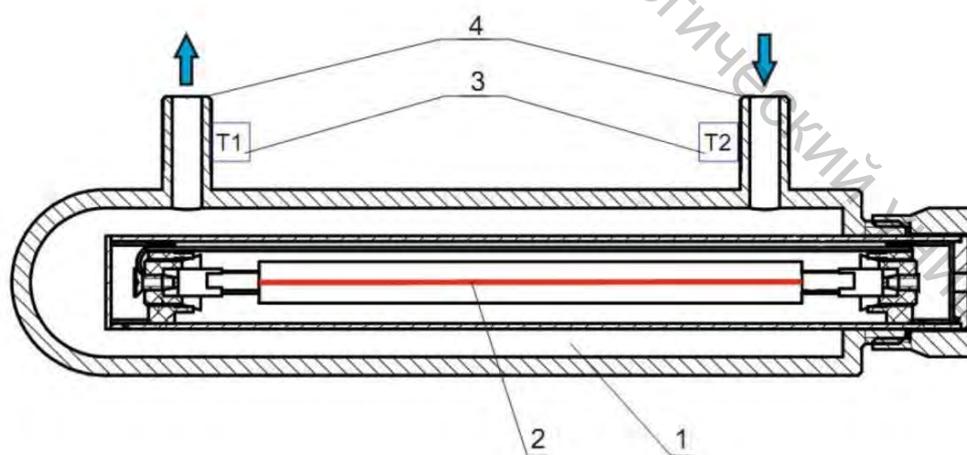


Рисунок 5.2 – Схема опытной установки для определения коэффициента излучения электропроводящих материалов калориметрическим методом
 1 – калориметр; 2 – исследуемый образец; 3 – датчики температуры;
 4 – подвод воды

Порядок проведения эксперимента

1. Установить модуль НТЦ-22.05.1/6 «Определение коэффициента излучения электропроводящих материалов калориметрическим методом» на перфорированную панель и закрепить поворотом крепежных рукояток во встречном направлении на четверть оборота. Подключить кабель модуля к разъему X1 на панели стенда.

2. Убедиться в том, что переключатели установлены в положения: SA1 БП-06 – «выкл»; SA1 БУ-02 (Насос-1) – «выкл»; SA3 БУ-02 – «нижнее положение»; SA2 БУ-02 (Насос-2) – «выкл»; SA5 БУ-02 – «выкл»; SA6 БУ-02 – «выкл»; RP1 БП-06 – «min»; RP2 БП-06 – «min».

3. Повернуть красную кнопку S2 БВ-03. Включить автоматический выключатель QF1 БВ-03. Нажать зеленую кнопку S1 БВ-03.

4. На ноутбуке запустить программу управления стендом PDind. Выбрать лабораторную работу 6.

5. 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.

6. Перевести переключатель SA1 БП-06 в положение «вкл».

7. Максимально открыть вентиль синего цвета на трубопроводе. Включить клавишный выключатель SA1 БУ-02 (Насос-1). Это приведет в работу циркуляционный насос охлаждающей воды. Установить вентилем расход $g_1 = 0,01-0,02$ л/с.

8. Рукояткой RP1 установить мощность электронагревателя по заданию преподавателя.

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

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

Порядок обработки результатов измерений

Коэффициент излучения вольфрамовой нити рассчитывается для каждого значения мощности тока по формуле (5.1). 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 $R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t)$ 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. Проведение расчетов сопровождается заполнением таблиц 5.1 и 5.2.

Таблица 5.1 – Результаты прямых измерений и параметров установки

Наименование величины и единица измерения	Номер опыта		
	I	II	III
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		

Таблица 5.2 – Характеристики лучистого теплообмена

Наименование величины	Расчётная формула, единицы измерения	Номер опыта		
		I	II	III
Сопротивление нити при прохождении тока	$R = P / I^2$, Ом			
Средняя температура поверхности нити	$t_1 = (R - R_0) / \alpha R_0$, где $\alpha = 4,6 \cdot 10^3$, °С ⁻¹			
	$T_1 = t_1 + 273,15$, К			
Тепловой поток, передаваемый за счет лучистого теплообмена	$Q_{\text{л}} = P$, Вт			
Средняя температура тепловоспринимающей поверхности	$t_2 = (t_{\text{вх}} - t_{\text{вых}}) / 2$, °С			
	$T_2 = t_2 + 273,15$, К			
Степень черноты наружной поверхности вольфрамовой нити				
Табличное значение для степени черноты вольфрамовой нити, бывшей в употреблении	$\epsilon_{300 \text{ К}} = 0,03$; $\epsilon_{3000 \text{ К}} = 0,3$			

В выводах следует представить зависимость степени черноты нити от температуры в графической форме.

Контрольные вопросы

1. Тепловое излучение. Как проявляется двойственная природа свойств?
2. Дайте определение понятий: спектральный и интегральный поток излучения, лучеиспускательная способность тела.
3. Сформулируйте закон Стефана-Больцмана для абсолютно черного и «серого» тел?
4. Что называется степенью черноты тела?
5. Дайте описание функциональной схемы экспериментальной установки.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ПРОЦЕССА В ТЕПЛООБМЕННОМ АППАРАТЕ ТИПА «ТРУБА В ТРУБЕ»

Цель работы: изучение теории теплообменных аппаратов, экспериментальное определение некоторых теплотехнических параметров теплообменника «труба в трубе», сравнительный анализ их значений при прямом токе и противотоке.

Основные теоретические сведения

Теплообменные аппараты (теплообменники) – это устройства, в которых теплота переходит от одной среды к другой.

Теплообмен между теплоносителями является одним из наиболее важных и часто используемых в технике процессов. Например, получение пара заданных параметров в парогенераторе основано на процессе передачи теплоты от одного теплоносителя к другому. В конденсаторах и градирнях тепловых электростанций, воздухоподогревателях доменных печей и многочисленных теплообменных устройствах химической промышленности основным рабочим процессом является процесс теплообмена между теплоносителями.

В зависимости от способа передачи тепла различают три основные группы теплообменных аппаратов:

1. **Рекуперативные**, в которых теплообмен между теплоносителями осуществляется через разделяющую их поверхность теплообмена.

2. **Смесительные**, в которых тепло передается от одного теплоносителя к другому при их непосредственном контакте.

3. **Регенеративные**, в которых одна и та же поверхность нагрева через определенные промежутки времени омывается то горячим теплоносителем, то холодным.

Независимо от принципа действия теплообменные аппараты, применяющиеся в разных областях техники, как правило, имеют свои специальные названия. Эти названия определяются технологическим назначением (холодильники, нагреватели, испарители, конденсаторы) и конструктивными особенностями теплообменных устройств (кожухотрубные теплообменники, оросительные, спиральные, блочные и т. д.).

В данной лабораторной работе объектом изучения являются **самая простая конструкция рекуперативного теплообменника (труба в трубе)**, которую образуют две коаксиально расположенные трубы с двумя теплоносителями. Один из них течет по внутренней трубе, а второй – по кольцевому каналу между трубами.

Их используют главным образом для охлаждения или нагревания в системе жидкость-жидкость, когда расходы теплоносителей невелики и последние не меняют своего агрегатного состояния. Иногда такие теплообменники применяют при высоком давлении для жидких и газообразных

сред, например, в качестве конденсаторов в химическом производстве.

Рекуперативные теплообменники бывают **прямоточные, противоточные** и с **перекрестным током**. У прямоточных теплообменников теплоносители движутся параллельно в одном направлении, у противоточных – теплоносители движутся параллельно в противоположных направлениях. У теплообменников с перекрестным током теплоносители движутся во взаимно перпендикулярных направлениях, при этом возможен однократный и многократный перекрестный ток.

Основным расчетным уравнением теплообменников является уравнение теплопередачи:

$$Q = k \cdot \Delta t_{cp} \cdot F, \quad (6.1)$$

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

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:

$$Q = G_1 c_1 (t'_1 - t''_1) = G_2 c_2 (t''_2 - t'_2),$$

где индекс «1» означает, что данная величина отнесена к горячей среде, а индекс «2» – к холодной; G_1, G_2 – массовые расходы горячего и холодного теплоносителей, кг/с; c_{p1}, c_{p2} – удельные (массовые) теплоемкости теплоносителей при постоянном давлении, Дж/кг·К; t'_1, t''_1 – температуры горячего теплоносителя на входе и выходе из аппарата, °С; t'_2, t''_2 – температуры холодного теплоносителя на входе и выходе его из аппарата, °С.

Средний температурный напор между средами определяется по зависимости:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\text{м}}}}, \quad (6.2)$$

где $\Delta t_{\delta}, \Delta t_{\text{м}}$ – больший и меньший температурные напоры между холодной и горячей средой. Формула может быть использована как при прямотоке, так и при противотоке.

Если $\frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\text{м}}} \leq 1,8$, то

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\delta} + \Delta t_{\text{м}}}{2}. \quad (6.3)$$

Порядок выполнения работы

Эксперимент проводится с использованием модуля, изображенного на рисунке 6.1.



Рисунок 6.1 – Модуль НТЦ-22.05.1/7 «Исследование теплового процесса в теплообменном аппарате типа «труба в трубе»»

Это действующая модель теплообменника «труба в трубе», которая является частью лабораторного стенда и имеет технические данные, указанные в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Технические данные модуля

Наименование параметра	Обозначение параметра	Значение и единица измерения
Длина теплообменной поверхности	L	0,5 м
Внутренний диаметр внешней трубы	D	22 мм
Наружный диаметр внутренней трубы	d_n	12 мм
Внутренний диаметр внутренней трубы	d_b	10 мм

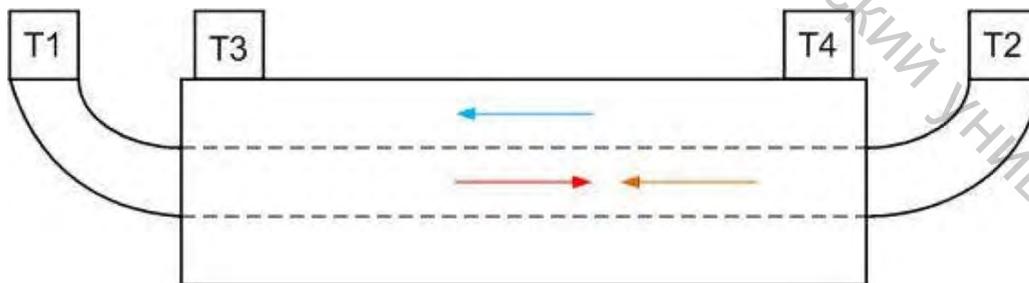


Рисунок 6.2 – Схема расположения датчиков температур

Внешняя труба теплоизолирована, все элементы установки, относящиеся к холодной воде, имеют синий цвет, а к горячей – красный. Вода (холодная) во внешней трубе движется только в одном направлении, а во внутренней (горячая) имеет возможность реверса – вход и выход меняются местами. Расходы горячей и холодной воды V_1 и V_2 регистрируются расходомерами

литрах в секунду. Теплообменник снабжен четырьмя датчиками температуры t_1, t_2, t_3, t_4 , расположенными на входах и выходах штуцеров (рис. 6.2). Значения температур отсчитываются по приборам, расположенным на панели стенда и имеющим соответствующие обозначения.

Порядок проведения эксперимента

1. Установить модуль «Исследование теплового процесса в теплообменном аппарате типа «труба в трубе» на перфорированную панель и закрепить поворотом крепежных рукояток во встречном направлении на четверть оборота. Подключить кабель модуля к разъему X1 на панели стенда. Подключить муфты шлангов контуров горячей и холодной воды к штуцерам модуля. Шланги подключения контура горячей воды – красного цвета, холодной воды – синего цвета (рис. 6.3).



Рисунок 6.3 – Измерительный модуль, установленный на лабораторный стенд

2. Убедиться в том, что переключатели установлены в положения: SA1 БП-06 – «выкл»; SA1 БУ-02 (Насос-1) – «выкл»; SA3 БУ-02 – «нижнее положение»; SA2 БУ-02 (Насос-2) – «выкл»; SA5 БУ-02 – «выкл»; SA6 БУ-02 – «выкл»; RP1 БП-06 – «min»; RP2 БП-06 – «min».

3. Повернуть красную кнопку S2 БВ-03. Включить автоматический выключатель QF1 БВ-03. Нажать зеленую кнопку S1 БВ-03.

4. На ноутбуке запустить программу управления стендом PDind. Выбрать лабораторную работу 7.

5. Открыть вентили на трубопроводе. Установить тумблер направления потока горячей воды SA3 БУ-02 вверх – противоток или вниз – прямоток. Включить клавишами SA1 БУ-02 (Насос-1) и SA2 БУ-02 (Насос-2) насосы холодной и горячей воды. Дождаться выхода воздуха из системы. Отрегулировать вентилями потоки по расходомерам g_1 и g_2 в пределах 0,05–0,08 л/с.

6. Включить терморегуляторы баков холодной и горячей воды клавишными выключателями SA5 БУ-02 и SA6 БУ-02.

7. Дождаться установившегося режима системы, при котором температура датчиков t_1, t_2, t_3, t_4 перестанет изменяться, температура горячей

воды t_1' достигнет установленной. Вентильями окончательно установить расход холодной и горячей воды, заданный преподавателем. Затем трижды с интервалом в 1–2 минуты осуществляют снятие показаний всех приборов. Показания заносятся в таблицу 6.2 наблюдений и полученные значения усредняются. Направление потока горячей воды устанавливать тумблером SA3 БУ-02.

Таблица 6.2 – Результаты прямых измерений

Теплоносители		Горячая вода			Холодная вода		
Параметры теплоносителей		t_1' , °С	t_1'' , °С	V_1 , л/с	t_2' , °С	t_2'' , °С	V_2 , л/с
Прямоток	1 изм.						
	2 изм.						
	3 изм.						
	Среднее						
Противоток	1 изм.						
	2 изм.						
	3 изм.						
	Среднее						

Порядок обработки результатов измерений

В качестве значений параметров теплоносителей по таблице 6.2 выступают их средние значения. Все расчеты проводятся для прямого тока и противотока в отдельности.

1. Определить средние значения температур:

$$t_1 = \frac{t_1' + t_1''}{2} \text{ и } t_2 = \frac{t_2' + t_2''}{2}.$$

По таблице 6.3 по значению t_1 находят для горячей воды плотность ρ_1 , кг/м³; удельная теплоёмкость c_1 , Дж/(кг·К). Аналогично по значению t_2 из таблицы 6.3 находят ρ_2 , c_2 .

Таблица 6.3 – Физические свойства воды на линии насыщения

t , °С	$p \cdot 10^{-5}$, Па	ρ , кг/м ³	c , кДж/(кг·К)
10	1,013	999,7	4,191
20	1,013	998,2	4,183
30	1,013	995,7	4,174
40	1,013	992,2	4,174
50	1,013	988,1	4,174
60	1,013	983,2	4,179
70	1,013	977,8	4,187
80	1,013	971,8	4,195
90	1,013	965,3	4,208

2. Вычислить массовые расходы соответственно горячего и холодного теплоносителей:

$$G_1 = \frac{V_1 \rho_1}{1000}; \quad G_2 = \frac{V_2 \rho_2}{1000}.$$

3. Определить тепловой поток, передаваемый горячей водой:

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

4. Определить тепловой поток, полученный холодной водой:

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

5. Определить тепловые потери в окружающую среду:

$$Q_{\text{п}} = Q_1 - Q_2.$$

6. Определяем средний или среднелогарифмический температурный напор по соответствующей формуле (6.1)–(6.2).

7. Определяем значение коэффициента теплопередачи по формуле:

$$k = \frac{Q_{\text{ср}}}{\Delta t_{\text{ср}} \cdot F},$$

где $F = \pi \cdot d_{\text{н}} \cdot L$; $Q_{\text{ср}} = \frac{Q_1 + Q_2}{2}$.

8. Результаты вычислений оформить в виде таблицы 6.4. Найти разницу значений теплотехнических параметров при прямотоке и противотоке и дать обоснование каждому результату.

Таблица 6.4 – Характеристики теплообмена в аппарате «труба в трубе»

Теплотехнический параметр	Q_1 , Вт	Q_2 , Вт	$Q_{\text{п}}$, Вт	$\Delta t_{\text{ср}}$, °С	k , Вт/(м ² К)
Прямой ток					
Противоток					
Разница значений					

Контрольные вопросы

1. Теплообменные аппараты, классификация.
2. Запишите и поясните уравнения теплопередачи и теплового баланса для расчета теплообменного аппарата.
3. Как определяется средний температурный напор?
4. Поясните схему лабораторной установки и конструкцию теплообменника типа «труба в трубе».
5. От чего зависят коэффициенты теплопередачи, как их можно увеличить в данном теплообменнике.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Горбачев, М. В. Тепломассообмен: учебное пособие / М. В. Горбачев. – Новосибирск: НГТУ, 2015. – 443 с.: рис. + Прил. – (Учебники НГТУ). – Библиогр. спис. (1чз; 2гчз).

2. Ерофеев, В. Л. Теплотехника: учебник для бакалавриата и магистратуры : для студентов высших учебных заведений, обучающихся по инженерно-техническим направлениям. В 2 т. Т. 1 : Термодинамика и теория теплообмена / В. Л. Ерофеев, А. С. Пряхин, П. Д. Семенов; под ред. В. Л. Ерофеева, А. С. Пряхина. – Москва: Юрайт, 2018. – 308 с. – (Бакалавр. Магистр). – Спис. лит. (1гчз).

3. Кудинов, В. А. Техническая термодинамика и теплопередача: учебник для академического бакалавриата : для студентов высших учебных заведений, обучающихся по инженерно-техническим направлениям и специальностям / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов, Е. В. Стефанюк. – 3-е изд., испр. и доп. – Москва: Юрайт, 2018. – 442 с. – (Бакалавр. Академический курс). – Лит. (1гчз).

4. Кудинов, В. А. Теплотехника: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров и магистров в области технических наук и по направлениям подготовки дипломированных специалистов в области техники и технологии / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов, Е. В. Стефанюк. – Москва: КУРС : ИНФРА-М, 2018. – 423 с. – Лит. (1гчз).

5. Тепло- и массообмен: учебное пособие для студентов учреждений, обеспечивающих получение высшего образования по строительным, энергетическим и машиностроительным специальностям. В 2 ч. Ч. 1 / Б. М. Хрусталева [и др.]; под общ. ред. А. П. Несенчука. – Минск: БНТУ, 2007. – 607 с. (1гчз).

6. Теплоэнергетика и теплотехника: справочная серия. В 4 кн. Кн. 2 : Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент : справочник / А. А. Александров [и др.]; под общ. ред. А. В. Клименко и В. М. Зорина. – 4-е изд., стер. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2007. – 561 с.: рис. – Спис. лит. (1гчз).

ИНФОРМАЦИЯ О ДОСТУПЕ К ВИРТУАЛЬНОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ УО «ВГТУ» И ЭЛЕКТРОННЫМ РЕСУРСАМ КАФЕДРЫ ТИОМП

Для удобства работы и развития навыков в работе с удаленными ресурсами студентам рекомендуется использовать материалы по учебной дисциплине, размещенные в виртуальной образовательной среде УО «ВГТУ» (sdo.vstu.by) и на сайте кафедры ТиОМП.

Учебное издание

Тепломассообмен

Методические указания по выполнению лабораторных работ

Составители:

Гусаров Алексей Михайлович
Жерносек Сергей Васильевич
Марущак Алексей Сергеевич

Редактор *Т.А. Осипова*

Корректор *Т.А. Осипова*

Компьютерная верстка *О.С. Герасимова*

Подписано к печати 10.01.2020. Формат 60x90¹/₁₆. Усл. печ. листов 2,9.
Уч.-изд. листов 3,7. Тираж 50 экз. Заказ № 9.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»
210038, г. Витебск, Московский пр., 72.

Отпечатано на ризографе учреждения образования

«Витебский государственный технологический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/172 от 12 февраля 2014 г.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1497 от 30 мая 2017 г.