

**Министерство образования и науки Российской Федерации
Набережночелнинский институт (филиал) федерального
государственного автономного образовательного
учреждения высшего профессионального образования
«Казанский (Приволжский) федеральный университет»
Кафедра высокоенергетических процессов и агрегатов**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООТДАЧИ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ
И ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТРУБЫ ПРИ СВОБОДНОЙ
КОНВЕКЦИИ ВОЗДУХА**

**Методические указания к лабораторным
работам**

**Набережные Челны
2015 г.**

УДК

Исраfilов И.Х., Галиакбаров А.Т., Лобачева Е.Ф.,
Рахимов Р.Р. Исследование теплоотдачи горизонтальной и
вертикальной трубы при свободной конвекции воздуха:
Методические указания к лабораторным работам. –
Набережные Челны: НЧИ КФУ, 2015. - 24 с.

Методические указания включают в себя два
методических указания к лабораторным работам по
исследованию теплоотдачи на горизонтальной и вертикальной
трубах при свободной конвекции, и предназначены в помощь
студентам при подготовке и выполнении лабораторных работ
по курсу термодинамика и теплопередача.

Ил.5, библиогр. 3 назв., приложений 5

Рецензент доцент к.т.н. доцент И.Д. Галимянов

Печатается в соответствии с решением научно-методического
совета НЧИ КФУ

Цель работы: Углубление знаний по теории теплоотдачи при свободном движении жидкости или газа, ознакомление с техникой экспериментального исследования процесса теплоотдачи на примере свободной конвекции, освоение методики обобщения опытных данных на основе методов теории подобия.

Задание.

1. Изучить основы теории конвекционного теплообмена и теории подобия.
2. Определить коэффициент теплоотдачи горизонтальной или вертикальной трубы при свободной конвекции воздуха и установить его зависимость от температурного напора.
3. Результаты опытов обработать методами теории подобия и сравнить их с соответствующими уравнениями подобия.

Основные теоретические положения

Понятие *конвективного теплообмена* охватывает процесс теплообмена при движении жидкости или газа. При этом перенос теплоты осуществляется одновременно конвекцией и теплопроводностью. Под *конвекцией* теплоты понимают перенос теплоты при перемещении макрочастиц жидкости или газа в пространстве из области с одной температурой в область с другой. Конвекция возможна только в текучей среде, здесь перенос теплоты неразрывно связан с переносом самой среды. Конвекция теплоты всегда сопровождается *теплопроводностью*, так как при движении жидкости или газа неизбежно происходит соприкосновение отдельных частиц, имеющих различные температуры.

Различают *свободную (естественную) и вынужденную конвекцию*. При *свободной конвекции* движение в рассматриваемом объеме жидкости возникает за счет неоднородности в нем массовых сил. Если жидкость с неоднородным распределением температуры, и, как следствие, с неоднородным распределением плотности, находится в поле земного тяготения, может возникнуть свободное

гравитационное движение. Пример естественной конвекции — распространение теплоты в помещении от горячей батареи. Слои воздуха, находящиеся в соприкосновении с горячей батареей, нагреваются, плотность нагретого объема воздуха уменьшается и он вытесняется вверх более тяжелым холодным воздухом.

При **вынужденной конвекции** движение рассматриваемого объема жидкости происходит под действием внешних поверхностных сил, приложенных на его границах за счет предварительно сообщенной кинетической энергии (например, за счет работы насоса, вентилятора, ветра).

Вынужденное движение в общем случае может сопровождаться свободным движением. Относительное влияние последнего тем больше, чем больше разница температур отдельных частиц среды и чем меньше скорость вынужденного движения. При больших скоростях вынужденного движения влияние свободной конвекции становится пренебрежимо малым.

Рассмотрим случай. Холодная жидкость омывает нагретую поверхность или нагретая жидкость находится у поверхности холодной стенки. Теплообмен между твердым телом и жидкостью осуществляется конвекцией в массе жидкости, расположенной вдали от поверхности тела, и теплопроводностью с конвекцией вблизи поверхности, или внутри так называемого **пограничного слоя**. Теплообмен через такой слой к общей массе жидкости происходит как **теплопроводностью**, так и путем **конвекции**. Конвективный теплообмен между потоками жидкости или газа и поверхностью соприкасающегося с ним тела называется **конвективной теплоотдачей** или **теплоотдачей**.

В расчетах конвективного теплообмена большие затруднения вызывает определение **коэффициента теплоотдачи** α , находящегося в зависимости от многочисленных факторов, характеризующих процесс теплопередачи: скорости движения газа или жидкости (W_f), их физических параметров — плотности (ρ), вязкости (ν),

теплоемкости (C_p), коэффициента теплопроводности (λ), температуры (T_w) и (T_f), режима движения, формы (Φ), размеров (I_1, I_2, \dots, I_n) и расположения поверхности по отношению к движущемуся газу или жидкости и многих других. Таким образом, коэффициент теплоотдачи α (в системе СИ измеряется в $\text{Вт}/\text{м}^2\text{К}$) является сложной функцией различных величин:

$$\alpha = f(W_f, \rho, T_w, T_f, \lambda, C_p, v, \Phi, I_1, I_2, \dots) \quad (1)$$

Интенсивность теплоотдачи оценивается коэффициентом теплоотдачи α . Согласно **закону Ньютона-Рихмана**, конвективный тепловой поток Q_k пропорционален разности температур стенки T_w и жидкости T_f и поверхности теплообмена F .

$$Q_k = \alpha(T_w - T_f) \cdot F \quad (2)$$

Общий принцип экспериментального определения коэффициента теплоотдачи α состоит в измерении количества тепла Q_k и температурного напора между стенкой и жидкостью $\Delta T = T_w - T_f$ в стационарном режиме. В действительных условиях работы различных теплообменных устройств теплота передается одновременно *теплопроводностью, конвекцией и излучением*. Такое явление называется **сложным теплообменом**. (Напоминаем, что *теплопроводность* представляет собой молекулярный перенос теплоты в телах (или между ними), обусловленный переменностью температуры в рассматриваемом пространстве. *Тепловое излучение* — процесс распространения теплоты с помощью электромагнитных волн, обусловленный только температурой и оптическими свойствами излучающего тела.)

Вследствие этого для определения коэффициента теплоотдачи α применяют зависимость:

$$Q = Q_k + Q_\varepsilon = \alpha(T_w - T_f)F + \varepsilon C_0 \left[(T_w/100)^4 - (T_f/100)^4 \right]F \quad (3)$$

Отсюда определяем α :

$$\alpha = \frac{Q - \varepsilon C_0 \left[(T_w/100)^4 - (T_f/100)^4 \right] F}{(T_w - T_f) F} \quad (4)$$

здесь ε - степень черноты тела,

$C_0 = 5,67 \text{ Bt}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела,

Q – полное количество теплоты (тепловой поток), отдаваемое телом (в опыте соответствует мощности нагревателя, вт) в стационарном режиме.

Теоретическое значение коэффициента теплоотдачи α может быть получено решением системы, состоящей из дифференциальных уравнений теплопроводности, движения, неразрывности, теплоотдачи и краевых условий. Совокупность этих уравнений математически полностью описывает процесс конвективного теплообмена. Аналитические решения вышеуказанной системы получены лишь для ограниченного числа задач, поэтому процессы конвективного теплообмена в основном изучаются экспериментальными методами. Но здесь необходимо отметить, что в последнее время в связи с развитием численных методов решения подобных систем дифференциальных уравнений и внедрением персональных компьютеров широкий класс задач конвективного теплообмена решается на ЭВМ.

Задача по определению коэффициента теплоотдачи α , значительно упрощается, если ее решать экспериментальным путем, пользуясь методом моделирования, основанным на *теории подобия*.

Теория подобия – это система понятий и законов, которые обосновывают возможность переноса результатов экспериментов с одного объекта (модели) на другой (реальный). Понятие подобия может быть распространено на любые физические явления. Можно, например, говорить о кинематическом подобии (подобие движения потоков

жидкости), о тепловом подобии (подобии распределения температур и тепловых потоков) и т.д.

Объединение математических методов с экспериментом с помощью теории подобия позволяет распространить результаты единичного опыта на целую группу явлений.

Сформулированные ниже условия в виде трех правил, являются определением подобия физических процессов.

1. *Подобные процессы должны быть качественно одинаковыми, т. е. они должны иметь одинаковую физическую природу и описываться одинаковыми по форме записи дифференциальными уравнениями.*

2. *Условия однозначности подобных процессов должны быть одинаковыми во всем, кроме числовых значений размерных постоянных, содержащихся в этих условиях.*

3. *Одноименные определяющие безразмерные переменные подобных процессов должны иметь одинаковое числовое значение.*

Первое условие говорит, что подобные процессы должны относиться к одному и тому же классу физических явлений. Помимо одинаковой физической природы подобные процессы должны характеризоваться одинаковыми по записи дифференциальными уравнениями.

Второе условие подобия требует, чтобы условия однозначности подобных процессов были одинаковыми во всем, кроме числовых значений постоянных, содержащихся в этих условиях.

Таким образом, запись размерных условий однозначности подобных процессов в общем виде (буквенном) должна быть идентична. При этом конкретные значения скорости набегающего потока, температуры стенки и т. д. могут иметь различные числовые значения.

Из первого и второго условий подобия следует, что подобные процессы должны описываться одинаковыми (тождественными) безразмерными дифференциальными уравнениями и безразмерными граничными условиями.

При соблюдении первых двух условий подобия исследуемые процессы будут зависеть от одних и тех же безразмерных переменных. Этот вывод неизбежно вытекает из

того, что подобные процессы описываются тождественными безразмерными уравнениями и граничными условиями.

Первых двух условий недостаточно для установления физического подобия. Нужно добавить третье условие, что одноименные определяющие безразмерные переменные подобных процессов должны иметь одинаковое числовое значение.

Теория подобия позволяет, не решая дифференциальные уравнения, описывать физическое явление, получить числа подобия и, используя опытные данные, установить функциональную зависимость между ними, т.е. *уравнения подобия*, справедливые для всех подобных процессов.

Критериями подобия называются числа подобия, которые по существу являются определяющими безразмерными переменными, составленные из постоянных величин не являющихся функцией независимых переменных.

Конвективный теплообмен характеризуется **четырьмя основными числами (критериями подобия) - Nu , Pr , Re , Gr** (см. приложение 1). *Критерий Нуссельта (Nu)* представляет собой безразмерный коэффициент теплоотдачи. *Критерий Рейнольдса (Re)* отражает влияние вынужденного движения, *критерий Грасгофа (Gr)* – влияние свободного движения, *критерий Прандтля (Pr)* – влияние физических свойств теплоносителя на коэффициент теплоотдачи. Числа подобия, составленные из независимых переменных и постоянных величин, определяющих характер процесса, но не включающих искомые величины, называются **определяющими**. Числа, включающие искомые зависимые переменные, называются **определяемыми**. Так, при расчёте конвективного теплообмена критерий Nu является определяемым, так как в него входит искомая величина α . Критерии же Re , Pr , Gr в этих же расчётах – определяющие.

Уравнением подобия называют зависимость между каким-либо определяемым числом подобия и другими определяющими числами подобия.

При расчёте конвективного теплообмена в различных теплообменных аппаратах искомой величиной, как правило,

является коэффициент теплоотдачи α . Поэтому уравнение подобия может быть представлено в следующем виде:

$$Nu = f(Pr, Re, Gr) \quad (5)$$

Это уравнение в некоторых случаях упрощается. Так, при свободном движении теплоносителя, из (5) можно получить:

$$Nu = f(Pr, Gr) \quad (6)$$

где $f(Pr, Gr)$ - есть степенная функция. Тогда:

$$Nu = c(Pr \cdot Gr)^n \quad (7)$$

Здесь c, n - постоянные числа, которые определяются количественно из экспериментальных данных.

безразмерные переменные можно разделить на два вида:

Для обработки экспериментальных данных и составления критериальных уравнений теплообмена необходимо выбрать определяющую температуру и определяющий размер. *Определяющей температурой* может быть средняя температура жидкости T_w , температура стенки T_f или средняя температура пограничного слоя

$$T_m = \frac{1}{2}(T_w + T_f).$$

Как правило, определяющая температура отмечается в форме подстрочных индексов у символа каждого числа подобия. При этой температуре и должны быть взяты все значения физических констант. Используемые при вычислении чисел подобий (λ, v, a, ρ, c).

За *определяющий размер L* , как правило, принимают диаметр трубы. Определяющий размер тоже указывается подстрочным индексом числа подобия.

За определяющий размер в наших опытах на вертикальной трубе принимаем длину рабочего участка l , а на горизонтальной – внешний диаметр трубы D , за определяющую температуру – среднюю температуру пограничного слоя T_m . Тогда уравнение (7) для вертикальной трубы принимает вид:

$$Nu_{ml} = c(Gr_{ml} \cdot Pr_m)^n \quad (8)$$

а для горизонтальной:

$$Nu_{mD} = c(Gr_{mD} \cdot Pr_m)^n \quad (9)$$

Прологарифмируя, к примеру, (8), получим

$$\lg(Nu_{Lf}) = \lg c + n \cdot \lg(Gr_{Lf} \cdot Pr_f) \quad (10)$$

Это уравнение прямой в логарифмических координатах. Вычисленные значения $\lg Nu$ отмечаются на графике (рис.1) напротив соответствующего значения $\lg(Gr_{Lf} \cdot Pr_f)$. По этим точкам проводится наилучшая прямая. Величина коэффициента С находится из соотношения:

$$C = Nu_{Lf} / (Gr_{Lf} \cdot Pr_f)^n \quad (11)$$

или из графика на рис. 1.

Показатель степени n определяют как тангенс угла между осью абсцисс и прямой: $n = \operatorname{tg} \varphi$. Некоторые значения C и n приведены в приложении 2.

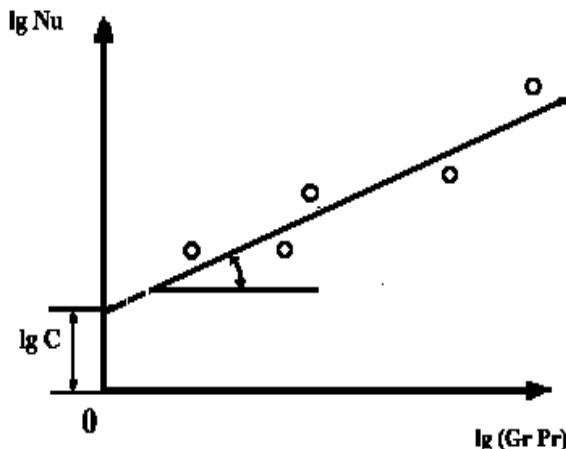


Рис. 1 График критериальной зависимости $Nu = c(Pr \cdot Gr)^n$ в логарифмических координатах

Лабораторная работа

Исследование теплоотдачи горизонтальной трубы

при свободной конвекции воздуха

Описание экспериментальной установки

Съемный рабочий участок экспериментальной установки представляет собой горизонтально расположенную тонкостенную трубу, изготовленную из нержавеющей стали, наружным диаметром 20 мм и длиной 874 мм (рис. 2, 3).

На внутреннюю поверхность трубы 1 заделаны горячие спаи - 12 термопар ТХК, свободные концы которых выведены через разъем и подключены к переключателю. Труба нагревается электрическим током низкого напряжения, который подводится к зажимам на концах трубы.

Электрическое сопротивление труб диаметром 20 мм составляет 0,068 Ом (с точностью $\pm 3\%$). Торцы труб теплоизолированы. Падение напряжения на рабочем участке регулируется лабораторным автотрансформатором 2 и измеряется комбинированным прибором 3 типа Ш-4313. Термо-ЭДС термопар измеряется милливольтметром 4 типа МВУ-41А. Градуированным в $^{\circ}\text{C}$ и соединенным с термопарами через переключатель 5. Милливольтметр МВУ-41А снабжен устройством для автоматической компенсации изменения термо-ЭДС, вызываемой отклонениями температуры от градуировочной. Температура окружающей среды измеряется лабораторным термометром.

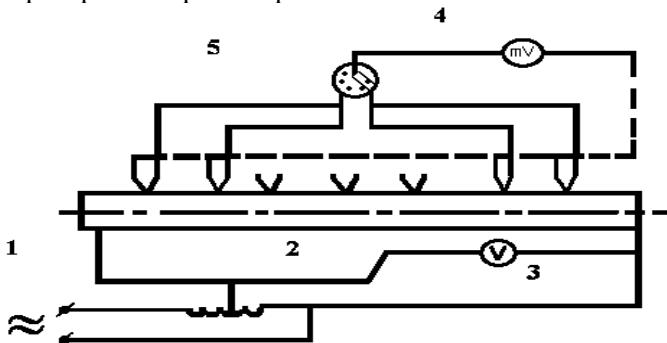


Рис. 2 Схема измерений

Порядок проведения эксперимента

Вывести против часовой стрелки регулятор 2 в нулевое положение и включить тумблером 6 электропитание установки. Тумблером 7, расположенным на блоке измерения мощности, включить питание прибора Щ-4313 и тумблером 8 - подачу напряжения на рабочий участок 1.

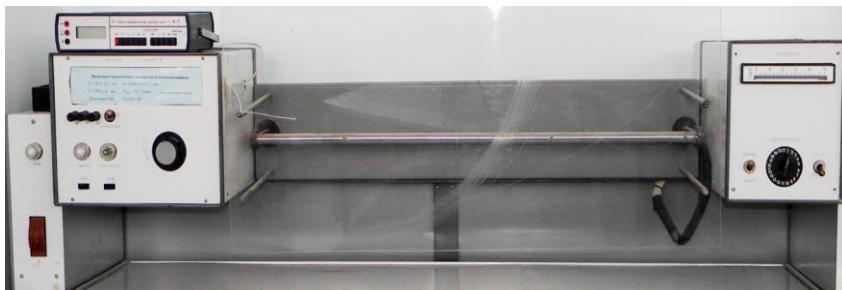


Рис. 3 Общий вид установки

С помощью ручки автотрансформатора 2 установить по вольтметру 3 падение напряжения на рабочем участке, равное 0,8 В и через 10 ± 15 мин (время, достаточное для выхода установки на стационарный режим) провести измерения температуры поверхности рабочего участка в 12 точках, снимая показания с милливольтметра 4. Номера термопар на переключателе 5 соответствуют номерам на схеме измерений. Показания темпопар T_w и окружающей среды T_f записать в таблицу (приложение 3). Через 3...5 мин следует повторить измерения и, если показания приборов за этот промежуток времени не изменились, то можно перейти к измерениям на других режимах ($U_2 = 1,3$ В, $U_3 = 1,7$ В). По окончании работы включить тумблер подачи напряжения на рабочий участок 7, вывести ручку автотрансформатора 2 в нулевое положение, выключить прибор Щ-4313 и подачу напряжения на установку (тумблера 8 и 6).

Обработка результатов измерений

Для представления полученных экспериментальных данных в форме зависимости (9) необходимо последовательно расчитать все величины по таблице в приложении 5.

При принятой в настоящей работе схеме нагрева цилиндра тепловой поток с поверхности трубы является постоянным, за исключением участков, прилегающих к токопадающим шинам. Поэтому при осреднении температуры поверхности цилиндра показания крайних термопар не учитываются. Тепловой поток определяется по электрической мощности, затрачиваемой на нагревания рабочего участка

$$q=U^2/(R \cdot F). \quad (12)$$

где F – площадь поверхности рабочего участка, m^2 .

Степень черноты поверхности ε принять равной 0,6, а значения физических констант для расчета чисел подобия выписать из приложения 4 по температуре T_m . Полученные значения, $lg \, Nu$ и $lg \, (Gr \cdot Pr)$ наносятся на график, как на рис. 1, определяются значения c и n для данного конкретного эксперимента и сравниваются со значениями c и n , приведенными в приложении 2.

Лабораторная работа
Исследования теплоотдачи вертикальной трубы при
свободной конвекции воздуха

Описание экспериментальной установки

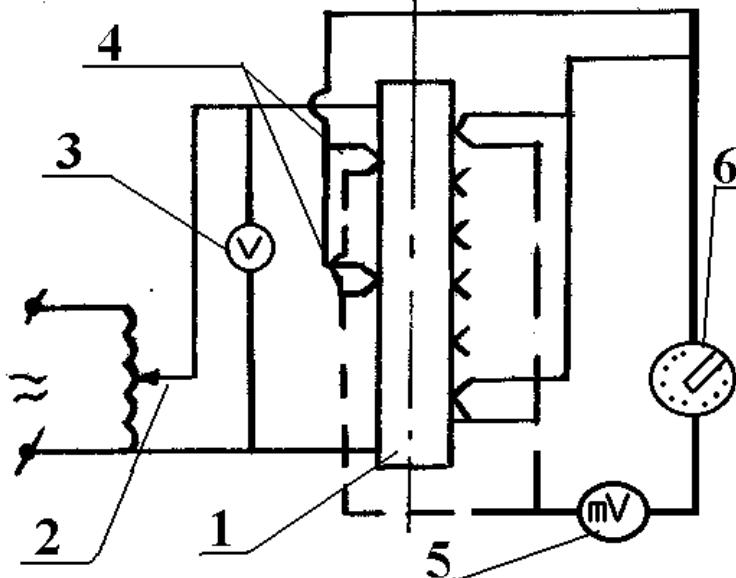


Рис.4 Схема измерений

Рабочий участок установки представляет собой тонкостенную трубу, изготовленную из нержавеющей стали, наружным диаметром $d = 40 \pm 0,1$ мм и длиной $l = 1600 \pm 5$ мм, расположенную вертикально (1 на рис. 4 и рис. 5). Труба нагревается электрическим током низкого напряжения, подводимым к трубе через автотрансформатор от внешней сети. Электрическое сопротивление трубы $R = (0,0195 \pm 0,00035)$ Ом определено в процессе изготовления установки. Электрическое напряжение, подведенное к зажимам на концах вертикальной трубы 1, регулируется автотрансформатором 2 и замеряется комбинированным прибором 3 типа Щ-4313.

Температура стенки трубы измеряется 12-ю термопарами ТХК, горячие спаи которых заделаны во внутреннюю стенку трубы по винтовой линии. Для устранения отвода тепла через внутреннюю поверхность торцы трубы заглушены. Координаты термопар от нижнего конца трубы приведены на рис. 4. Вблизи наружной стенки трубы на расстоянии 400 мм друг от друга установлены две передвижные термопары 4 для измерения температуры воздуха в пристеночном слое.

Температура регистрируется милливольтметром 5 типа МВУ-41А, градуированным в $^{\circ}\text{C}$ и соединенным с термопарами через многопозиционный переключатель 6. Милливольтметр имеет компенсационное устройство, исключающее необходимость иметь холодный спай в среде с нулевой температурой. Температура окружающего воздуха измеряется лабораторным термометром.



Рис. 5 Общий вид установки

Порядок проведения эксперимента

Ручку регулятора мощности 2 на панели приборов установить в нулевое положение. Тумблером 7 включить установки (загорается контрольная лампа 8).

Включить нагрев рабочего участка тумблером 9 и питание прибора Щ-4313 тумблером 10. Вращая ручку регулятора мощности по часовой стрелке, установить падение напряжение на рабочем участке, равное 0,9 В.

Наблюдая в течение 10..15 мин за показаниями термометрами по шкале милливольтметра 5, убедиться в установлении стационарного режима и записать падение напряжения на рабочем участке, показания 12 термопар и лабораторного термометра, фиксирующего температуру окружающего воздуха. Измерить температуры в пограничном слое термопарами (T_{13} и T_{14}). Эти данные занести в протокол наблюдений (приложение 3).

Обработка результатов измерений

Результатами экспериментального исследования теплоотдачи вертикального цилиндра при естественной конвекции представляются так же, как и в случае горизонтального цилиндра, критериальным уравнением вида (7), а с учетом выбора характерного размера длины L – уравнением (9).

Как и в случае горизонтальной трубы, последовательно просчитываются электрическая мощность, подведенная к рабочему участку, средняя температура стенки трубы. Дальнейший расчет ведется по формулам таблицы обработки опытных данных (приложение 5). При этом принять $\varepsilon=0,15$.

Нанести полученные значения критериев подобия на график, построенный в логарифмической системе координат (рис.1) и аппроксимировать экспериментальные точки линейной зависимостью.

Определить постоянные c и n , входящие в критериальное уравнение, и сравнить их с имеющимися в литературе данными (приложение 2).

По показаниям термопар 4 (T_{13} и T_{14}) построить безразмерные профили температуры пограничного слоя.

$$\frac{(T_w - T_1)}{T_w - T_f} = \left(\frac{y}{\delta_T} \right) \quad (13)$$

и сравнить полученный профиль температур с термическим:

$$\frac{(T_w - T_1)}{T_w - T_f} = \left(\frac{1 - y}{\delta_T} \right)^2 \quad (14)$$

где T_1 - измеренные значения температур в сечениях пограничного слоя, $^{\circ}\text{C}$; y - расстояние от поверхности трубы, м; δ_T - толщина теплового пограничного слоя, м.

Толщина теплового пограничного слоя обычно определяется как расстояние от стенки, на которой температура отличается от температуры невозмущенного потока не более чем на 1 %.

Оценка погрешностей измерений

Погрешность измерения коэффициента теплоотдачи как в случае горизонтального, так и в случае вертикального цилиндра, в соответствии с расчетными зависимостями (1) \div (10) определяется по формуле:

$$\delta\alpha = \frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \sqrt{\left(\frac{2\Delta U}{U} \right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{R} \right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d} \right)^2 + \left(\frac{\Delta l}{l} \right)^2 + \left(\frac{\Delta T_w + \Delta T_f}{T_w - T_f} \right)^2} \quad (5)$$

Абсолютные погрешности изменений величин, входящих в уравнение (15), определяются в соответствии с классом точности используемых приборов. Допуски на размеры рабочего участка приведены на рисунках и в тексте.

Контрольные вопросы

1. Назовите элементарные виды теплообмена. Дайте характеристику каждому виду.
2. Что такое конвективный теплообмен? Каковы причины движения теплоносителя?
3. Какие факторы влияют на коэффициент теплоотдачи?
4. В чем состоит сущность теории подобия? Для чего она нужна?
5. Какие зависимости называются уравнениями подобия?
6. Напишите числа подобия и объясните их физический смысл.
7. Какие числа подобия называются определяющими, а какие определяемыми?
8. Что такое определяющая температура?
9. Что такое определяющий размер?
10. Опишите экспериментальную установку и порядок работы на ней.
11. Как выбрать из таблицы коэффициент кинематической вязкости?
12. Объясните порядок обобщения опытных данных с помощью метода подобия.
13. Что нужно сделать для того, чтобы существенно увеличить точность определения коэффициента теплоотдачи?

Литература

1. Замалеев З. Х. Основы гидравлики и теплотехники / З. Х. Замалеев, В. Н. Посохин, В. М. Чефанов. – Санкт-Петербург : Лань, 2014. – 352 с. – ISBN 978-5-8114-1531-1. – Режим доступа:http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=39145.
2. Теплотехника [Текст] : учебник / [авт. кол.: И. Е. Иванов и др.] ; под ред. М. Г. Шатрова. - Москва : Академия, 2011. - 288 с. : ил. - (Высшее профессиональное образование). - Библиогр.: с. 283. - Прил.: с. 269-282. - Доп. УМО. - В пер. - ISBN 978-5-

7695-6860-2.

3. Круглов Г. А. Теплотехника [Текст] : учебное пособие для вузов / Г. А. Круглов, Р. И. Булгакова, Е. С. Круглова. - Санкт-Петербург : Лань, 2010. - 208 с. : ил. - ([Учебники для вузов. Специальная литература]). - Библиогр.: с. 204-205. - Рек. УМО. - В пер. - ISBN 978-5-8114-1017-0.

4. Лекции по теплотехнике: конспект лекций [Электронный ресурс]/ сост. В. А. Никитин. – Оренбург: Оренбургский гос. ун-т, 2011. - 532 с. - Режим доступа:<http://www.bibliorossica.com/book.html?currBookId=8744>.

5. Теплотехника : учебник для студ. инж.-техн. спец. вузов / А. П. Баскаков, Б. В. Берг, Витт, О.К. [и др.] ; под ред. А.П. Баскакова. - 3-е изд., перераб. и доп. - М. : БАСТЕТ, 2010. - 328 с. + диагр. : ил., 1 с. вкл. - Библиогр.: с. 321. - ISBN 978-5-903178-19-3 (16экз.).

6. Теплотехника : учебник для студ. вузов по спец. "Эксплуатация наземн. транспорта и трансп. оборудования" / М. Г. Шатров, И. Е. Иванов, Пришвин, С.А. [и др.] ; под ред. М.Г.Шатрова. - М. : Академия, 2011. - 288 с. : ил. - (Высшее проф. образование. Транспорт). - Библиогр.: с. 283. - ISBN 978-5-7695-6860-2 (21 экз.).

7. Синявский Ю.В. Сборник задач по курсу Теплотехника : учеб. пособие для студ. вузов по спец. 260602 (271300) "Пищевая инженерия малых предприятий" направл. подгот. дипломир. спец-та 260600 (655800) "Пищевая инженерия" / Ю. В. Синявский. - СПб. : ГИОРД, 2010. - 128 с. : ил. - Библиогр.: с. 127. - ISBN 978-5-98879-114-0 (21 экз.).

8. Техническая термодинамика и теплотехника : учеб. пособие для студ. вузов / Л. Т. Бахшиева [и др.] ; под ред. А.А. Захаровой . - 2-е изд., испр. - М. : Академия, 2008. - 272 с. : ил. - (Высшее проф. образование. Химическая технология). - Библиогр.: с. 270. - ISBN 978-5-7695-4999-1 (15 экз.).

Приложение 1
Основные числа подобия и их физический смысл

Формула Название числа	Величины, входящие в число	Значение
$R_e = \frac{wL}{\nu}$ - Число Рейнольдса (критерий режима движения жидкости)	w – скорость потока, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$; L – характерный размер, м; ν – коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$	Характеризует гидродинамический режим движения, являясь мерой отношения сил инерции (ρw^2) и вязкости $\mu w/L$. При малых силах инерции и больших силах вязкости движение ламинарное, в противоположном случае – турбулентное. Существует критическое число Рейнольдса, определяющее переход от ламинарного течения к турбулентному. Например, для течения воды в круглой трубе $Re_{kp}=2320$.
$Gr = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu^2}$ Число Грасгофа (критерий подъемной силы)	β - коэффициент объемного расширения, К^{-1} $\beta = \frac{1}{T}$ – для идеального газа; $g=9,81$ ускорение свободного падения, $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$; ΔT - температурный напор, К, L – определяющий линейный размер поверхности теплообмена, м; ν – коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.	Характеризует гидродинамический режим течения при свободной конвекции; Отражает соотношение между подъемной силой (архимедова сила) и силой вязкостного трения. Чем интенсивнее свободное движение, тем больше Gr .

$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda}$ <p>Число Нуссельта (критерий теплоотдачи)</p>	<p>α - коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/\text{м}^2\text{К}$.</p> <p>$\lambda$ – коэффициент телопроводности жидкости, $\text{Вт}/\text{м К}$.</p> <p>L – характерный размер, м</p>	<p>конвективной</p> <p>телопроводности</p> <p>Характеризует соотношение между конвективным теплообменом и передачей тепла теплопроводностью в жидкости на границе тела. Чем выше Nu, тем интенсивнее процесс конвективного теплообмена. Число Нуссельта всегда ≥ 1. То есть тепловой поток за счёт конвекции всегда превышает по своей величине тепловой поток за счёт теплопроводности.</p>
$Pr_f = \frac{\nu \rho c_p}{\lambda} = \frac{\nu}{a}$ <p>Число Прандтля (критерий физических свойств жидкости)</p>	<p>Pr_f – теплоемкость при $p=\text{const}$, $\text{Дж}/\text{кг К}$.</p> <p>a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2\text{с}^{-1}$,</p> <p>ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$,</p> <p>ν – коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$</p> <p>$\lambda$ – коэффициент телопроводности жидкости, $\text{Вт}/\text{м К}$.</p>	<p>Учитывает влияние физических свойств теплоносителя на теплоотдачу, и определяется отношением скорости диффузии к температуропроводности жидкости.</p>

Приложение 2

Теплоотдача при свободной конвекции

№	Омываемые поверхности	Схематическое представление	<i>c</i>	<i>n</i>	Режим течения потока	Литература
1.	Горизонтально расположенный цилиндр		0,54 0,47 0,1	0,25 0,25 0,33	Ламинарный ----- Турбулентный	(1) (3) (3)
		L=D				
2.	Вертикальный цилиндр небольшого диаметра		0,69 0,135	0,25 0,33	Ламинарный Турбулентный	(3) (1)

21

Приложение 3

Протокол наблюдений

№ опыта	Напряжение на раб. уч. <i>U, В</i>	Температура поверхности трубы, <i>T_w, °C</i>												<i>T_w, °C</i>	<i>T_f, °C</i>
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		

Расстояние от стенки <i>y, мм</i>	Температура пограничного слоя, °C	
	18	14

Приложение 4

Термофизические свойства воздуха

$t, {}^{\circ}\text{C}$	$c_p, 10^3$ Дж/кг·К	$\lambda, 10^{-2}$ Вт/м·К	$a, 10^{-6}$ м ² /с	$\nu, 10^{-6}$ м ² /с	$\rho,$ кг/м ³
10	1,005	2,51	20,0	14,16	1,247
20	1,005	2,59	21,4	15,06	1,205
30	1,005	2,67	22,9	16,00	1,165
40	1,005	2,67	24,3	16,96	1,128
50	1,005	2,83	25,7	17,95	1,093
60	1,005	2,90	27,2	18,97	1,060
70	1,009	2,96	28,6	20,02	1,029
80	1,009	3,05	30,2	21,09	1,000
90	1,009	3,13	31,9	22,10	0,972
100	1,009	3,21	33,6	23,13	0,946
120	1,009	3,35	37,0	23,45	0,898
140	1,013	3,49	40,4	27,8	0,898
160	1,017	3,64	44,0	30,1	0,815
180	1,022	3,78	47,6	32,5	0,799
200	1,026	3,93	51,1	34,35	0,746
250	1,038	4,27	61,0	40,61	0,674
300	1,047	4,6	71,6	48,33	0,615

Приложение 5
Таблица обработки опытных данных

Расчетная величина	Расчетная формула	№ опыта				
		1	2	3	4	5
Определяющая температура	T_m, K					
Температурный напор	$\Delta T = T_w - T_f, K$					
Тепловая мощность	$Q = \frac{U^2}{R} B_T$					
Поверхность теплообмена	$F = \pi \cdot d \cdot L, m^2$					
Количество теплоты, отдаваемое среде излучения	$Q_{\text{И}} = \varepsilon \cdot C_0 \left[\left(\frac{T_w}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_f}{100} \right)^4 \right] \cdot F$ Вт					
Полный коэффициент теплоотдачи	$\alpha = \frac{Q}{F \cdot \Delta T}, \frac{B_T}{m^2 \cdot K}$					
Коэффициент конвективной теплоотдачи	$\alpha_k = \frac{Q - Q_{\text{И}}}{F \cdot \Delta T}, \frac{B_T}{m^2 \cdot K}$					
Число Прандтля	$Pr_m = \frac{\nu}{a}$					
Число Грасгофа	$Gr_m = g \beta \Delta T \frac{L^3}{\nu^2}$					
Логарифм	$lg(Gr_m \cdot Pr_m)$					
Число Нуссельта	$Nu_m = \alpha_k \cdot L / \lambda$					
Логарифм	$lg (Nu_m)$					