

УДК 621.226.

Составители: И.Р.Чеховский, И.И.Сокол, Л.Е.Кудрявцева,
В.А.Кудрявцев.

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент *Г.Г.Щедрина*

Определение коэффициента теплоотдачи горизонтальной трубы при свободном движении воздуха: методические указания к лабораторной работе по теплотехнике для студентов технических специальностей/ Юго-Зап. гос. ун-т.; сост.: И.Р.Чеховский, И.И.Сокол, Л.Е. Кудрявцева, В.А.Кудрявцев, Курск, 2012. 8с., ил.1, табл. 2. Библиогр.: с. 8.

Излагаются методические рекомендации по опытному и теоретическому определению коэффициента теплоотдачи при свободном движении воздуха.

Работа предназначена для студентов технических специальностей

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать . Формат 60x84 1/16.
Усл.печ.л.0,46.Уч. изд.л.0,42.Тираж экз.Заказ Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября

Целью работы является углубление знаний по теории конвективного теплообмена, ознакомление с методикой опытного исследования процесса теплообмена и получение навыков в проведении эксперимента.

Задание

1. Определить опытным путём коэффициент теплоотдачи конвекцией от горизонтальной трубы к воздуху.
2. Вычислить теоретическое значение коэффициента теплоотдачи от горизонтальной трубы к воздуху по критериальному уравнению и сравнить его с опытным значением.
3. Составить отчёт по работе.

Теоретическая часть

В жидкостях и газах перенос тепла происходит при перемещении и перемешивании частиц с различной температурой. Обычно жидкости и газы нагреваются или охлаждаются при соприкосновении с поверхностями твердых тел.

Процесс теплообмена между поверхностью твердого тела и жидкостью или газом называется теплоотдачей или конвективным теплообменом. При этом перенос тепла осуществляется конвекцией и теплопроводностью.

В лабораторной работе рассматривается процесс теплоотдачи длинного цилиндра (трубы), расположенного в воздушной среде. Вдали от трубы воздух неподвижен и имеет постоянную температуру, равную t_f , а температура поверхности трубы не меняется во времени и равна t_w . Вблизи трубы температура воздуха изменяется от t_w до t_f , поэтому плотность воздуха у поверхности трубы будет меньше, чем вдали от неё. Вследствие разности плотностей воздуха возникает подъёмная сила, которая перемещает нагретые частицы воздуха вверх. На место переместившихся частиц воздуха поступают холодные частицы.

Движение воздуха, обусловленное разностью плотностей нагретых и холодных частиц, называют свободной или естественной конвекцией. Если движение газа или жидкости создаётся вентилятором или насосом, то конвекция называется вынужденной.

Тепловой поток, отдаваемый конвекцией от нагретой поверхности к жидкости или газу, определяется по формуле Ньютона-Рихмана

$$Q_k = \alpha_k \cdot F \cdot (t_w - t_f), \quad (1)$$

где Q_k – тепловой поток, отдаваемый конвекцией, Вт; F – поверхность трубки, м²; t_w – температура поверхности трубки, °С; t_f – температура воздуха вдали от трубки, °С; α_k – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м²·К).

Коэффициент теплоотдачи α_k определяет интенсивность теплообмена и равен количеству тепла, отдаваемого в единицу времени единицей поверхности при разности температур поверхности и воздуха 1 К.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией α_k зависит от скорости движения жидкости или газа, от температуры поверхности t_w , температуры газа (жидкости) t_f , физических свойств газа (жидкости), размеров и формы поверхности тела, его положения и многих других факторов, т.е.

$$\alpha_k = f(w, t_w, t_f, \rho, c, \lambda, \beta, \nu, d_1, d_2, \ell \dots).$$

Поэтому в расчетах конвективного теплообмена определение коэффициента теплоотдачи α_k вызывает большие затруднения.

Из опыта можно найти коэффициент теплоотдачи α_k только для конкретной среды и для заданных условий эксперимента. Для переноса полученных результатов на другие рабочие среды и другие условия эксперимента прибегают к теории подобия.

Для установления подобия физических процессов отдельные физические размерные величины объединяют в безразмерные комплексы, которые называют критериями или числами подобия и которым присваивают имена выдающихся ученых.

Основные критерии теплового подобия: Nu – критерий Нуссельта; Pr – критерий Прандтля; Gr – критерий Грасгофа; Re – критерий Рейнольдса.

Критерий Нуссельта характеризует теплообмен на границе между стенкой и жидкостью (газом).

$$Nu = \alpha_k \cdot \ell / \lambda_f, \quad (2)$$

где α_k – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); ℓ – определяющий размер поверхности теплообмена, м; λ_f – коэффициент теплопроводности жидкости или газа при определяющей температуре, Вт/(м·К).

Критерий Прандтля характеризует влияние теплофизических свойств жидкости (газа) на теплообмен.

$$Pr=(\nu \cdot \rho \cdot c_p) / \lambda = \nu / a, \quad (3)$$

где $\rho, \lambda, a, c_p, \nu$ - соответственно плотность, кг/м³; коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); коэффициент температуропроводности, м²/с; изобарная массовая теплоёмкость, Дж/(кг·К); коэффициент кинематической вязкости жидкости или газа, (м²/с), при определяющей температуре.

Критерий Грасгофа характеризует подъёмную силу, возникающую в жидкости или газе вследствие разности плотностей.

$$Gr=(g \cdot \beta \cdot \ell^3 \cdot \Delta t) / \nu^2, \quad (4)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²; β - температурный коэффициент объёмного расширения жидкости или газа, 1/К; ℓ - определяющий размер поверхности теплообмена, м; Δt - разность температур поверхности тела и жидкости, К.

Критерий Рейнольдса определяет гидромеханическое подобие течения жидкостей (газов) и характеризует режим движения жидкостей (газов).

$$Re=w \cdot \ell / \nu, \quad (5)$$

где w – определяющая скорость жидкости или газа, м/с; ℓ - определяющий размер, м (например, диаметр трубы, длина пластины и т.д.).

Если физические процессы подобны друг другу, то одноименные критерии подобия имеют одинаковую величину (1-я теорема подобия). Согласно второй теореме подобия связь между критериями подобия можно представить в виде зависимости

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

При свободном движении воздуха в неограниченном пространстве критериальное уравнение имеет вид

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

где C и n – постоянные опытные величины.

Описание опытной установки

Опытная установка представляет собой горизонтальную медную трубу диаметром $d=0,025$ м и длиной $\ell=0,935$ м. Внутри трубы находится электрический нагреватель 7. Мощность, потребляемая нагревателем, регулируется лабораторным автотрансформатором 8 и измеряется ваттметром 9.

Для измерения температуры поверхности трубы t_w в её стенке заложены хромель-копелевые термопары 1-5, а температура воздуха вдали от трубки t_f измеряется термопарой 6. Термопары 1-6 подключены к шеститочечному автоматическому потенциометру 10. По шкале потенциометра производится отсчет температур в $^{\circ}\text{C}$. Торцы трубки защищены тепловой изоляцией 11.

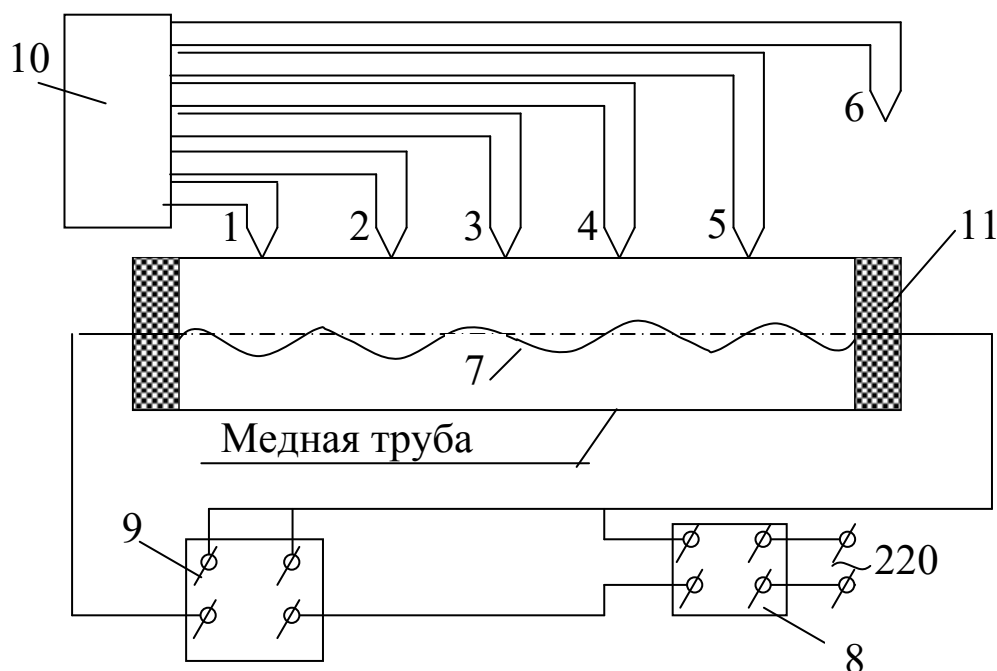


Рис. Опытная установка

Проведение опыта

Установку включает и выключает преподаватель. Тепловой режим трубы регулируется при помощи автотрансформатора 8. Установив мощность нагревателя (40-60 Вт), необходимо следить за тем, чтобы она оставалась неизменной в течение всего опыта. Установка прогревается примерно 50-60 минут. После того как наступит стационарное состояние, записывают показания всех термопар 1-6 в табл.1. Производят три записи показаний термопар, делая интервал между записями 1-2 мин.

Таблица 1

Протокол испытаний

Номера термопар	1	2	3	4	5	6
Измеряемая температура	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
1 замер						
2 замер						

3 замер						
Среднее значение						
Мощность электрического нагревателя Q=.....Вт.						

Обработка результатов опыта

1. Определение α_k опытным путем

1.1. Определяется средняя температура поверхности трубки t_w , °С.

$$t_w = (t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5) / 5, \quad (8)$$

где t_1, t_2, \dots, t_5 – средние значения температур поверхности трубки в т.т. 1-5.

1.2. Вычисляется поверхность трубки F , м².

$$F = \pi \cdot d \cdot \ell, \quad (9)$$

где d – диаметр трубки, м; ℓ – длина трубки, м.

Измеренная в опыте мощность электрического нагревателя отдаётся поверхностью трубки в окружающую среду двумя путями: лучистым Q_l и конвективным Q_k , т.е. общий тепловой поток состоит из двух потоков

$$Q = Q_l + Q_k. \quad (10)$$

1.3. Определяется тепло Q_l , Вт, отдаваемое трубкой в окружающую среду путём теплового излучения.

$$Q_l = \varepsilon \cdot c_0 \cdot F \cdot \{ [(273 + t_w) / 100]^4 - [(273 + t_f) / 100]^4 \}, \quad (11)$$

где ε – 0,38 – степень черноты поверхности трубки; $c_0 = 5,67$ Вт/(м²·К⁴) – коэффициент лучеиспускания абсолютно чёрного тела.

1.4. Находится тепло Q_k , Вт, отдаваемое трубкой в окружающую среду путем конвекции.

$$Q_k = Q - Q_l. \quad (12)$$

1.5. Вычисляется коэффициент теплоотдачи α_k , Вт/(м²·К) из уравнения Ньютона-Рихмана (1).

$$\alpha_k = Q_k / [F(t_w - t_f)]. \quad (13)$$

2. Определение теоретического значения α_k

2.1. Критерий Gr_f определяется по уравнению (4).

$$Gr_f = \frac{g \cdot d^3}{\nu_f^2} \cdot \beta_f (t_w - t_f),$$

где $g = 9,81$ м/с², d – внешний диаметр трубы, м; t_w – температура поверхности трубы, °С; t_f – температура воздуха вдали от трубки, °С;

ν_f – коэффициент кинематической вязкости воздуха при температуре t_f , $\text{м}^2/\text{с}$; $\beta_f=1/(273+t_f)$ -коэффициент термического расширения, $1/\text{К}$.

2.2. Вычисляется значение критерия Nu_f .

$$Nu_f=0,5(Gr_f Pr_f)^{0,25}, \quad (14)$$

где $C=0,5$, $n=0,25$ - для горизонтальной трубы.

Значения коэффициента теплопроводности, λ_f , коэффициента кинематической вязкости, ν_f , и критерия Прандтля, Pr_f , находим из табл.2 по температуре t_f .

2.3. Из критерия Нуссельта Nu_f находится коэффициент теплоотдачи конвекцией.

$$\alpha_k=Nu_f \cdot \lambda_f/d. \quad (15)$$

После этого сравниваются значения α_k , полученные опытным и теоретическим путем .

Таблица 2

Физические параметры сухого воздуха при давлении 101325 Па

$t, ^\circ\text{C}$	10	20	30
$\lambda_f, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	0,02551	0,0259	0,0267
$\nu_f, \text{м}^2/\text{с}$	$14,16 \cdot 10^{-6}$	$15,06 \cdot 10^{-6}$	$16,01 \cdot 10^{-6}$
Pr_f	0,705	0,703	0,701

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое теплоотдача? Что такое естественная конвекция?
2. Основное уравнение теплоотдачи.
3. Коэффициент теплоотдачи, физический смысл, размерность.
4. Критериальное уравнение теплоотдачи при свободной конвекции.
5. Критерии подобия, формулы, физический смысл.
6. Определяющий размер и определяющая температура.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Теплотехнические измерения и приборы /Г.И.Иванова, Н.Д.Кузнецов, В.С.Чистяков. – М.: МЭИ, 2005. 450с.
2. Теплотехника: Учеб. для вузов/А.П.Баскаков, Б.В.Берг, О.К.Витт и др.; Под ред. А.П.Баскакова. -М.: ООО «ИД “Бастет”», 2010.-328с.
3. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Под общ. ред В.М.Зорина: М.: Энергоатом-

издат, 1988, 560 с.

4. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача.-
М.: Высш. шк., 1980.-469 с.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра управления инновациями
Кафедра теплогазоснабжения и вентиляции



ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОВОГО ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Методические указания к выполнению лабораторной работы
по дисциплине «Теплотехника»
для студентов технических специальностей

Курск 2013

УДК 621.1

Составители: И.Р. Чеховский, И.И. Сокол, Л.Е. Кудрявцева,
В.А. Кудрявцев, Е.М. Кувардина

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент кафедры
теплогазоснабжения и вентиляции Г.Г.Щедрина

Исследование газового изотермического процесса: методические указания к выполнению лабораторной работы по дисциплине «Теплотехника» / Юго-Зап. гос. ун-т.; сост.: И.Р. Чеховский, И.И. Сокол, Л.Е. Кудрявцева, В.А. Кудрявцев, Е.М. Кувардина, Курск, 2013. 8 с., ил.4, табл.1. Библиогр.: с.8.

Излагаются методические рекомендации по исследованию газового изотермического процесса.

Предназначены для студентов технических специальностей.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать . Формат 60x84 1/16.
Усл.печ.л.0,46 . Уч.-изд.л. 0,42. Тираж экз. Заказ . Бесплатно.
Юго-Западный государственный университет.
305040 Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

Целью работы является изучение изотермических процессов сжатия и расширения воздуха.

Задание

1. Провести экспериментальное исследование изотермического процесса сжатия и расширения воздуха.
2. Составить отчёт по выполненной работе.

Теоретическая часть

Процесс, в котором не изменяется температура газа, называется изотермическим процессом, а линия, изображающая этот процесс – изотермой. Из уравнения состояния $p\nu=R\Gamma$ при $\Gamma=\text{const}$ уравнение изотермы будет иметь вид $p\nu = \text{const}$, а график изотермы в p - ν -диаграмме-это равнобокая гипербола (рис.1).

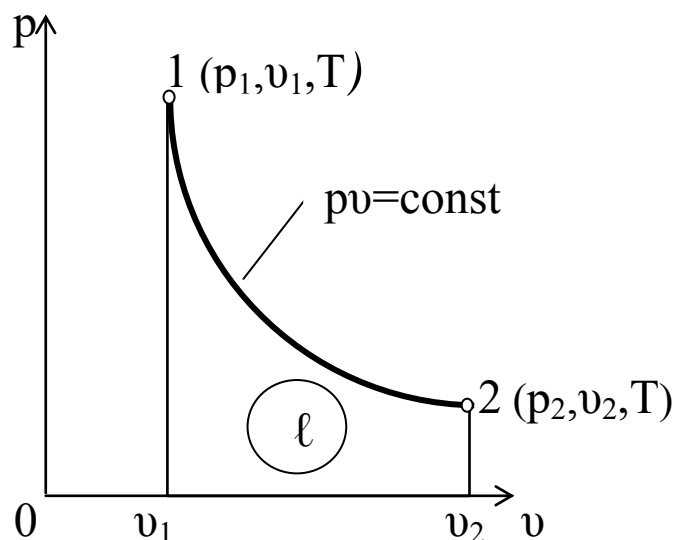


Рис. 1. Изотермический процесс в $p - \nu$ диаграмме

Из уравнения процесса $p\nu=\text{const}$ следует, что давление и удельный объём обратно пропорциональные величины, т.е. $p_2/p_1=\nu_1/\nu_2$.

Так как $\Gamma = \text{const}$, то $d\Gamma = 0$. Тогда изменение внутренней энергии $du = c_v \cdot d\Gamma = 0$ и изменение энтальпии $di = c_p \cdot d\Gamma = 0$, т.е. внутренняя энергия u и энтальпия i в процессе не изменяются ($u=\text{const}$ и $i=\text{const}$).

Работа 1 кг идеального газа в процессе $\Gamma = \text{const}$ равна

$$\ell = \int_{v_1}^{v_2} p dv = \text{const} \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v} = RT \ln(v_2/v_1) = p_1 v_1 \ln(v_1/v_2) = RT \ln(p_1/p_2)$$

и в p - v диаграмме изображается площадкой, ограниченной линией процесса 1-2, ординатами крайних точек 1 и 2 и осью абсцисс.

Так как $du = 0$, то первый закон термодинамики $dq = du + d\ell$ для изотермического процесса имеет вид $dq = d\ell$ или $q = \ell = RT \ln(v_2/v_1)$. Отсюда видно, что если газ расширяется, т.е. $v_2 > v_1$, то работа ℓ и теплота q имеет знак (+) и всё подводимое к газу тепло расходуется на совершение работы, а при изотермическом сжатии

($v_2 < v_1$) q и ℓ имеет знак (-) и вся затраченная работа ℓ отводится от газа в виде теплоты q .

В T - S диаграмме изотерма ($T = \text{const}$) изображается горизонтальной прямой 1-2 (рис.2).

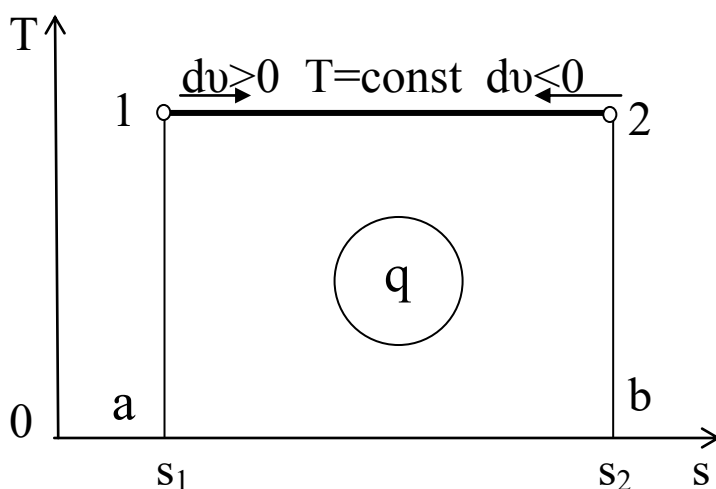


Рис. 2. Изотермический процесс в $T - s$

Тепло, участвующее в процессе 1-2, изображается в T - s диаграмме площадкой прямоугольника 12ba1, т.е. $q = T \cdot (s_2 - s_1)$, откуда изменение энтропии $s_2 - s_1 = q/T = R \cdot \ln(v_2/v_1)$.

Из этой формулы следует, что при расширении газа $dv > 0$, тепло к газу подводится и энтропия газа увеличивается, а при сжатии газа $dv < 0$, тепло от газа отводится и энтропия газа уменьшается.

Изотермический процесс является частным случаем политропного процесса, описываемого уравнением $pV^n = \text{const}$, где n – показатель политропы, который может изменяться от $-\infty$ до $+\infty$. Для изотермического процесса $n = 1$, т.к. $pV = \text{const}$.

Итак, для изотермического процесса для M кг газа можно записать

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 = P_3 V_3 = PV = \text{const},$$

откуда $P_2 V_2 / P_1 V_1 = P_3 V_3 / P_1 V_1 = P_3 V_3 / P_2 V_2 = \text{const} = 1$.

Экспериментальная установка

Установка (рис.3) представляет собой две соединенные резиновым шлангом 1 вертикальные бюретки 2, наполовину заполненные водой.

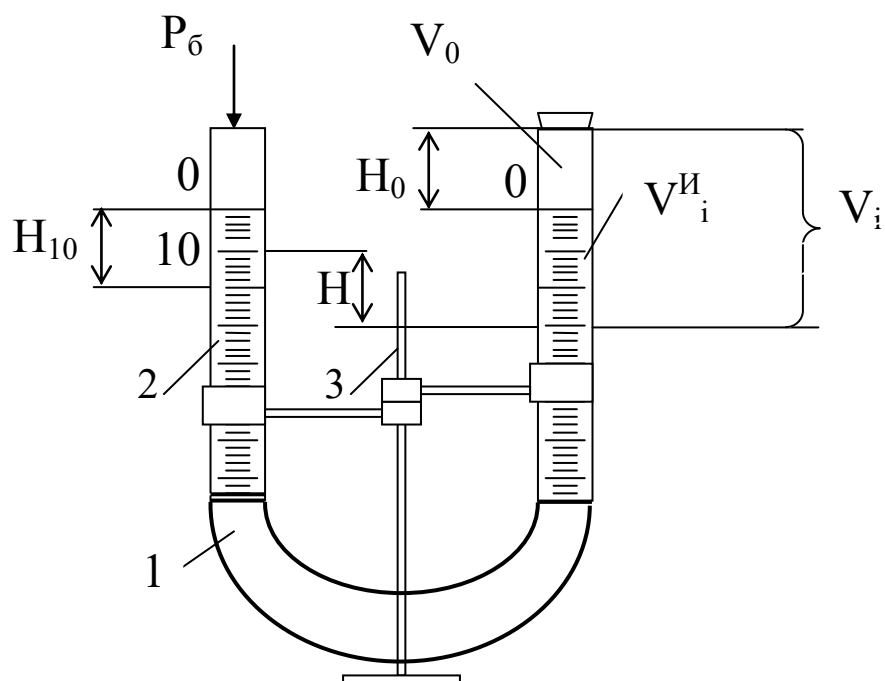


Рис. 3. Схема установки

Бюретки установлены в штативе 3. Одна бюретка герметически закрыта резиновой пробкой. Воздух, заключенный между пробкой и водой в этой бюретке, служит рабочим телом, с которым проводится процесс. Вторая бюретка открыта и служит для создания и измерения давления в закрытой бюретке.

Для измерения атмосферного давления используется барометр.

Проведение опыта и обработка опытных данных

Проводится три опыта, для каждого из которых вычисляются объём воздуха V_i (м^3) и его абсолютное давление в закрытой бюретке, P_i (Па).

Объём воздуха V_i (мл) определяется суммой объёмов: объёма заключённого между пробкой и нулевой отметкой шкалы V_0 и объёма, замеренного по шкале, V_i^{II} .
$$V_i = V_0 + V_i^{\text{II}}$$

Для определения объёма V_0 линейкой измеряют высоту этого объёма H_0 и высоту объёма 10 мл (по шкале бюретки) H_{10} . Искомый объём в мл находится по соотношению $V_0 = 10 \cdot H_0 / H_{10}$. (Величина V_0 для всех 3-х опытов одна и та же.)

Первый замер (рис. 4,а) проводим при одинаковых уровнях воды в бюретках. В этом случае давление на уровни воды в бюретках одинаково и равно атмосферному давлению $P_1 = P_6$ и $H = 0$. Объём воздуха $V_1 = V_0 + V_1^{\text{II}}$.

Второй замер (рис. 4,б) проводим при давлении выше атмосферного. Сжатие воздуха осуществляем поднятием открытой бюретки до получения разницы уровней воды в бюретках 100÷150 мм. При этом давление воздуха в закрытой бюретке уравнивается столбом жидкости H и барометрическим давлением P_6 , т.е. $P_2 = P_6 + H \cdot 9,81$ (Па). Объём воздуха $V_2 = V_0 + V_2^{\text{II}}$.

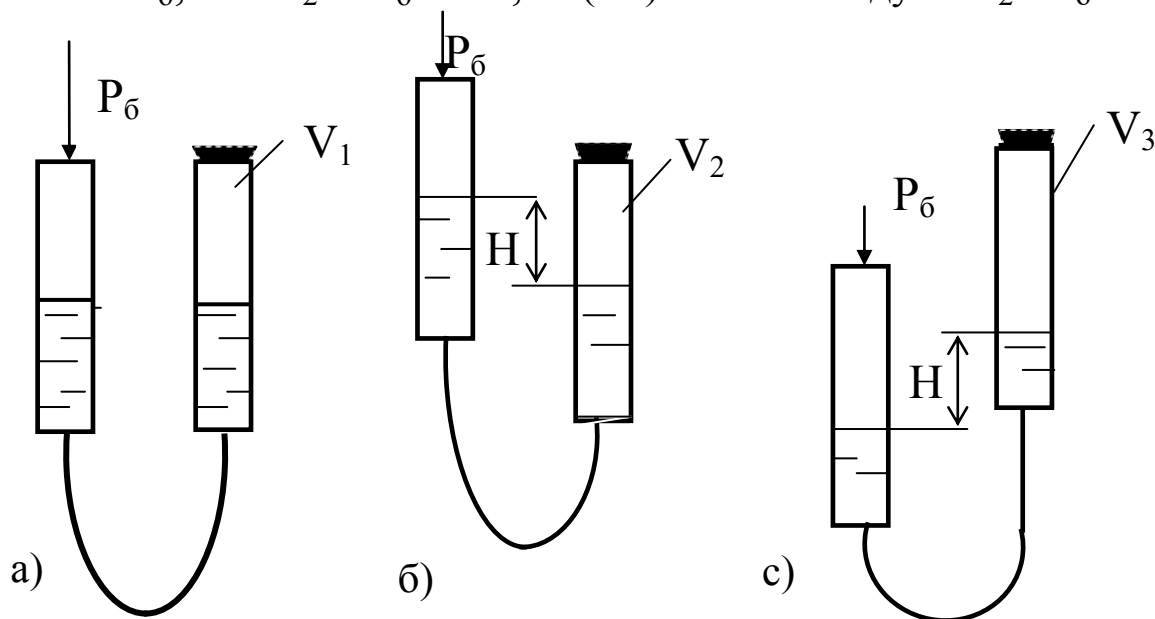


Рис. 4. Схема замера

Третий замер (рис. 4,с) проводим при давлении ниже атмосферного. Расширение воздуха осуществляем опусканием открытой бюретки до получения разницы уровней воды в бюретках 100÷150 мм. В этом случае в закрытой бюретке абсолютное давление будет ниже атмосферного и его величина определяется разницей атмосферного и столба жидкости Н. $P_3 = P_6 \cdot H \cdot 9,81$ (Па).

Объём воздуха $V_3 = V_0 + V_1^И$.

Для каждого замера определяем произведение давления и объёма, $P_i \cdot V_i$ (Па·м³), составляем и находим отношения

$P_2 V_2 / P_1 V_1$ и $P_3 V_3 / P_1 V_1$ и сравниваем их с единицей.

Результаты измерений и расчётов заносим в протокол работы.

Таблица

Протокол лабораторной работы

Пара метр	Измеряемый объём воздуха по шкале, $V_i^И$	Полный объём, $V_i = V_0 + V_i^И$		Разность уровней, Н	Абсолютное давление, P_i	Произведение, $P_i \cdot V_i$
		мл	м ³			
№ замера	мл	мл	м ³	мм.вод.ст.	Па	Па·м ³
1						
2						
3						
Атмосферное давление $P_6 =$ Па. Объем, заключенный между пробкой и нулевой отметкой шкалы, $V_0 =$ мл						

Отчёт по выполненной работе должен содержать

1. Исходные данные работы.
2. Задание и схему установки.
3. Протокол лабораторной работы и обработку результатов опыта.
4. Изображение изотермического процесса в P-V и T-S координатах.

Контрольные вопросы

1. Понятия идеального и реального газа.
2. Основные термодинамические процессы.
3. Изображение изотермического процесса в P - V и T - s координатах.
4. Определение теплоты и работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Теплотехнические измерения и приборы/Г.И.Иванова, Н.Д.Кузнецов, В.С.Чистяков.-М.: МЭИ 2005. 450с.
2. Теплотехника: Учеб.для вузов/ А.П.Баскаков, Б.В.Берг, О.К.Витт и др.; Под ред. А.П.Баскакова.-М.:ООО «ИД Бастет», 2010.-328с.
3. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: Справочник/ Под общ. Ред.В.М.Зорина: М.: Энергоатомиздат, 1988, 560 с.
4. Нащокин В.В.Техническая термодинамика и теплопередача: Учеб.пособие для ВУЗов. М.: Высш.шк., 1980. 469 с.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра управления инновациями
Кафедра теплогазоснабжения и вентиляции



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗОБАРНОЙ ТЕПЛОЁМКОСТИ ВОЗДУХА

Методические указания к выполнению лабораторной работы по
дисциплине «Теплотехника»
для студентов технических специальностей

Курск 2013

УДК 621.1

Составители: И.Р. Чеховский, И.И. Сокол, Л.Е. Кудрявцева,
В.А. Кудрявцев, Е.М. Кувардина.

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент кафедры тепло-
газоснабжение и вентиляция *Г.Г.Щедрина*

Определение изобарной теплоемкости воздуха: методические указания к выполнению лабораторной работы по дисциплине «Теплотехника»; / Юго-Зап. гос. ун-т.; сост.: И.Р. Чеховский, И.И. Сокол, Л.Е. Кудрявцева, В.А. Кудрявцев, Е.М. Кувардина, Курск, 2013. 8 с., ил. 1 , табл. 1. Библиогр.: с. 8.

Излагаются методические рекомендации по определению изобарной массовой теплоемкости воздуха методом протока.

Предназначены для студентов технических специальностей.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать . Формат 60x84 1/16.
Усл.печ.л.0,46. Уч. изд.л.0,42. Тираж экз. Заказ Бесплатно.
Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября

Целью работы является закрепление знаний по разделу курса "Теплоемкость газов" и освоение экспериментального определения теплоемкости газов методом протока.

Задание

1. Из опыта определить изобарную массовую теплоемкость воздуха при атмосферном давлении.
2. Составить отчет по выполненной работе.

Теоретическая часть

Теплоемкостью называется количество теплоты, которое нужно подвести или отвести от тела, чтобы изменить его температуру на 1 градус (1°C или 1 К).

Если теплоемкость относят к 1 кг газа, то ее принято называть массовой теплоемкостью и обозначать буквой c , Дж/(кг·К).

Если теплоемкость относят к 1 м^3 (взятому при нормальных физических условиях: $p=101325 \text{ Па}$, $T=273,15 \text{ К}$) или к 1 молю газа, то ее называют соответственно объемной или мольной и обозначают c' Дж/($\text{м}^3 \cdot \text{К}$) и $\mu c = \bar{c}$ Дж/(кмоль·К), соответственно. Теплоемкости c , c' и μc связаны между собой соотношениями:

$$c = \mu c / \mu = c' / \rho; \quad c' = \rho \cdot c = c / 22,4 c'; \quad \bar{c} = \mu c = \mu \cdot c = c \cdot 22,4$$

где μ – молекулярная масса газа, кг/кмоль;

ρ – плотность газа при нормальных физических условиях, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Теплоемкость газов зависит от температуры, если $\Delta t = t_2 - t_1 \rightarrow 0$, то мы имеем истинную теплоемкость. В общем случае теплоемкость может быть представлена квадратичной зависимостью, т.е.

$$c = dq/dt = a + b \cdot t + d \cdot t^2,$$

где $c = dq/dt$ – истинная массовая теплоемкость газа при температуре t ;

a , b и d – опытные константы, зависящие от природы газа и характера процесса.

Теплоемкость газа в каком-либо интервале температур t_1 и t_2 называется средней теплоемкостью и обозначается $\left[c \right]_{t_1}^{t_2}$. В интерва-

ле температур от t_1 до t_2 средняя теплоемкость определяется по формуле

$$c \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{q}{t_2 - t_1},$$

где q – количество теплоты, затраченное для нагрева газа от температуры t_1 до температуры t_2 .

В теплотехнике широко используют теплоемкость газа в изохорном и изобарном процессах, т. е. c_v и c_p .

Всегда $c_p > c_v$, а для идеальных газов $c_p - c_v = R$ (Уравнение Майера) или $\mu c_p - \mu c_v = 8314$ Дж/(кмоль·К),

где R – индивидуальная газовая постоянная, Дж/(кг·К);

8314 – универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К);

Отношение $c_p/c_v = k$, где k – показатель адиабатного процесса, который зависит от атомности газа. Для одноатомных газов $k = 1,67$, для 2-х атомных $k = 1,4$, а для 3-х и более атомных $k = 1,3$

Для наиболее распространенных газов составлены справочные таблицы средних теплоемкостей для температур 0-2500⁰С с интервалом 100⁰С. Используя табличные значения средних теплоемкостей $c \Big|_0^{t_1}$ и $c \Big|_0^{t_2}$

и, можно найти среднюю теплоемкость в интервале температур от t_1 до t_2 $c \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{c \Big|_0^{t_2} \cdot t_2 - c \Big|_0^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1}$

Количество теплоты, затрачиваемой для нагрева G кг, или V м³, или M молей газа от t_1 до t_2 , находятся по формулам:

$$Q = G \cdot c \Big|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1); \quad Q = V c' \Big|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1); \quad Q = M \cdot \bar{c} \Big|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1), \quad (\text{Дж})$$

Теплоемкость газовой смеси равна:

$$\text{массовая } c_{см} = \sum_{i=1}^n g_i \cdot c_i; \quad \text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

$$\text{объемная } c'_{см} = \sum_{i=1}^n r_i \cdot c'_i; \quad \text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$$

$$\text{мольная } \bar{c}_{см} = \sum_{i=1}^n r_i \cdot \bar{c}_i; \quad \text{Дж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К}).$$

где g_i , r_i – массовые и объемные доли газовой смеси, соответственно.

Описание установки и методики эксперимента

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1.

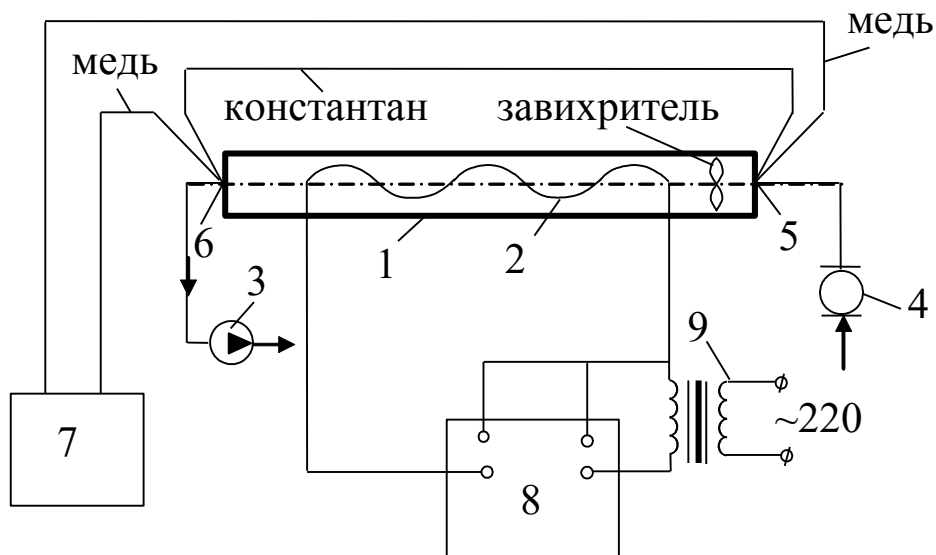


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

1- стеклянная труба; 2 – электрический нагреватель; 3 - вентилятор; 4 – газовый счетчик; 5 – холодный спай термопары; 6 – горячий спай термопары; 7 – милливольтметр; 8 – ваттметр; 9- ЛАТР

Протекание воздуха через стеклянную трубу 1 обеспечивается вентилятором 3. Исследуемый воздух засасывается из помещения лаборатории, проходит через газовый счетчик 4 и трубу, в которой расположен электрический нагреватель 2. Мощность нагревателя регулируется при помощи ЛАТРа 9 и измеряется ваттметром 8. Температура воздуха на входе в газовый счетчик измеряется жидкостно-стеклянным термометром. Нагрев воздуха определяется с помощью медь-константановой дифференциальной термопары, холодный спай 5 которой расположен до нагревателя, а горячий спай 6 - за нагревателем. Электродвижущая сила термопары измеряется с помощью переносного милливольтметра 7.

Для лучшего перемешивания воздуха в трубе 1 установлен завихритель. Труба 1 нагревается теплым воздухом, проходящим внутри нее, поэтому какая-то часть тепла будет теряться через трубу в окружающую среду.

Проведение опыта и обработка результатов измерений

Установку включает и выключает преподаватель или лаборант. Сначала включить вентилятор, а потом электрический нагреватель. Перед включением нагревателя необходимо повернуть ручку ЛАТРа против часовой стрелки до отказа, что будет соответствовать нулевому напряжению на выходе из ЛАТРа. Включить ЛАТР в электрическую сеть и при его помощи установить мощность нагревателя $30 \div 50$ Вт.

Жидкостно-стеклянным термометром измерить температуру воздуха t_0 на входе в газовый счетчик.

При помощи секундомера измерить время прохождения через установку ΔV м³ воздуха.

Измерить при помощи милливольтметра значение ЭДС дифференциальной термопары, E в mV.

Все замеры производить через 7-10 мин после включения установки.

Результаты измерений занести в таблицу.

Таблица опытных данных

Номера замеров	Q, Вт	ΔV , м ³	τ , с	P_0 , Па	t_0 , °C	E, mV

Обработка опытных данных

1. Определяем секундный массовый расход воздуха через установку G (кг/с) по формуле:

$$G = \rho \cdot \Delta V / \tau,$$

где τ – время прохождения через установку ΔV м³ воздуха;
 ρ – плотность воздуха, кг/м³.

2. Плотность воздуха вычисляем из уравнения Клапейрона по формуле:

$$\rho = p_0 / (R \cdot T_0),$$

где $R = 287$ Дж/(кг·К) – индивидуальная газовая постоянная воздуха;
 p_0 – давление атмосферного воздуха, Па;
 T_0 – абсолютная температура атмосферного воздуха, К,
 $T_0 = 273 + t_0$;

3. Измеряем значение э.д.с. дифференциальной термопары E , mV и определяем по формуле на сколько нагрелся воздух при прохождении через трубу, $^{\circ}C$:

$$\Delta t = 24,5 \cdot E,$$

где 24,5 – переводной коэффициент милливольт в градусы для медь-константановой термопары.

4. Из уравнения: $Q = G \cdot c_p \cdot \Delta t$

определим массовую изобарную теплоемкость c_p (Дж/кг·К) воздуха

$$c_p = 0,98 \cdot Q / (G \cdot \Delta t),$$

где 0,98 – коэффициент, учитывающий потери тепла поверхностью стеклянной трубки в окружающую среду;

Q – мощность электронагревателя, Вт.

Контрольные вопросы

1. Определение теплоемкости, размерность. Виды теплоемкости.
2. Какую теплоемкость воздуха определяли в работе? Зная эту теплоемкость, определить другие теплоемкости воздуха: c_v , c_v , c_p , μc_p , μc_v .
3. Формула Майера. Физический смысл газовой постоянной.
4. Используя уравнение Клапейрона, получить формулу для вычисления плотности воздуха.
5. Схема экспериментальной установки и порядок проведения работы.
6. Первый закон термодинамики, аналитическое выражение.
7. Определение цены деления по шкале ваттметра.
10. Измерение э.д.с. термопары потенциометром

Отчет по работе должен содержать:

1. Краткое описание работы.
2. Схему установки.
3. Протокол записи показаний измерительных приборов.
4. Обработку результатов опыта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Теплотехнические измерения и приборы/Г.И.Иванова, Н.Д.Кузнецов, В.С.Чистяков. – М.: МЭИ, 2005. 450с.
2. Теплотехника: Учеб.для вузов/А.П.Баскаков, Б.В.Берг, О.К.Витт и др.; Под ред. А.П.Баскакова.-М.:ООО «ИД “Бастет”», 2010.-328с.
3. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Под общ. ред В.М.Зорина: М.: Энергоатомиздат, 1988, 560 с.
4. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача.- М.:Высш.шк., 1980.-469 с.
5. Рабинович О.М. Сборник задач по технической термодинамике.-М.: Машиностроение,1973. 344 с.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра управления инновациями
Кафедра теплогазоснабжения и вентиляции



« ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ИЗЛУЧЕНИЯ И СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ ТВЕРДОГО ТЕЛА»

Методические указания к выполнению лабораторной работы по
дисциплине “Теплотехника” для студентов технических специальностей

Курск - 2013

УДК 621.226.

Составители: И.И. Сокол, Л.Е. Кудрявцева, В.А. Кудрявцев,
И.Р. Чеховский.

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент Г.Г.Щедрина

Определение коэффициента излучения и степени черноты твердого тела: методические указания к выполнению лабораторной работы по дисциплине “Теплотехника” для студентов технических специальностей/ Юго-Зап. гос. ун-т.; сост.: И.И. Сокол, Л.Е. Кудрявцева, В.А. Кудрявцев, И.Р. Чеховский, Курск, 2013. 8 с., ил.1, табл. 2. Библиогр.: с. 8.

Излагаются методические рекомендации к выполнению лабораторной работы по определению коэффициента излучения и степени черноты твердого тела. Рассматривается устройство экспериментальной установки и обработка полученных данных.

Работа предназначена для студентов технических специальностей, изучающих теплотехнические дисциплины.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать . Формат 60x84 1/16.
Усл. печ.л.0,46.Уч. изд.л.0,42.Тираж экз.Заказ Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября

Целью работы является углубление знаний по теории лучистого теплообмена, изучение методики проведения работы и развитие навыков в проведении эксперимента.

ЗАДАНИЕ

1. Определить опытным путем коэффициент излучения и степень черноты окисленной поверхности медной трубы.
2. Сравнить полученные результаты с табличными данными степени черноты для аналогичной поверхности.
3. Составить отчет по выполненной работе.

Теплообмен излучением – передача теплоты, связанная с превращением внутренней энергии тела в энергию электромагнитных волн (или фотонов) и последующим превращением последней во внутреннюю энергию других тел.

В инженерных расчетах теплообмен излучением между телами, разделенными прозрачной (диатермичной) средой, проводится в предположении о том, что излучающие поверхности серые.

Серым телом называется тело, имеющее непрерывный спектр излучения.

Поверхностная плотность потока собственного излучения тела, Вт/м², имеющего абсолютную температуру T , К,

$$E = \varepsilon C_0 (0,017)^4 = C (0,017)^4,$$

где ε – интегральный коэффициент теплового излучения – отношение плотностей потока излучения E реального тела и абсолютно черного тела E_0 или отношение коэффициентов лучеиспускания реального тела C и абсолютно черного тела $C_0 = 5,67$ Вт/(м²·К⁴). Тогда для реального тела

$$C = \varepsilon C_0.$$

Значение C изменяется от 0 до 5,67, а ε изменяется от 0 до 1.

Тепловой поток излучения $Q_{1,2}$, Вт, между двумя телами, имеющими температуры T_1 и T_2 ($T_1 > T_2$), определяется в общем виде по формуле

$$Q_{1,2} = \varepsilon_{\text{пр}} C_0 [(T_{w1}/100)^4 - (T_{w2}/100)^4] \cdot F, \text{ Вт},$$

где $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенный коэффициент теплового излучения системы двух тел; $\varepsilon_{\text{пр}} C_0 = C_{\text{пр}}$ – приведенный коэффициент лучеиспускания системы двух тел; F_1 – площадь поверхности тела с температурой T_1 , м².

Приведенный коэффициент теплового излучения $\varepsilon_{\text{пр}}$ системы двух тел с коэффициентами теплового излучения ε_1 первого и ε_2 второго тела определяется по формулам:

1) два тела с параллельными поверхностями больших размеров, угловые коэффициенты $\varphi_{1,2}=\varphi_{2,1}=1$ и формула () принимает вид

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \left[\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right]^{-4};$$

2) тело с площадью поверхности F_1 находится внутри другого тела с площадью поверхности F_2 . Угловые коэффициенты $\varphi_{1,2}=1$, $\varphi_{2,1}<1$. С учетом () формула () принимает вид

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \left[\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \right]^{-1}.$$

При $F_2 \gg F_1$ имеем $F_1/F_2 \rightarrow 0$, тогда $\varepsilon_{\text{пр}} = \varepsilon_1$;

3) при наличии n плоских экранов, расположенных между двумя телами с параллельными поверхностями больших размеров

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \left[\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} + 2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{\varepsilon_{\text{э}i}} - (n+1) \right]^{-1}.$$

Лучисто-конвективный теплообмен между телами с температурами T_1 и T_2 ($T_1 > T_2$):

1) тепловой поток $Q_{\text{л.к}}$, Вт, и его плотность $q_{\text{л.к}}$, Вт/м²,

$$Q_{\text{л.к}} = Q_{\text{л}} + Q_{\text{к}} = \varepsilon_{\text{пр}} C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F_1 + \alpha_{\text{к}} (T_1 - T_2) F_1;$$

$$q_{\text{л.к}} = q_{\text{л}} + q_{\text{к}} = \varepsilon_{\text{пр}} C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] + \alpha_{\text{к}} (T_1 - T_2),$$

или $q_{\text{л.к}} = q_{\text{л}} + q_{\text{к}} = (\alpha_{\text{л}} + \alpha_{\text{к}}) (T_1 - T_2) = \alpha_{\text{л.к}} (T_1 - T_2)$.

ОПИСАНИЕ ОПЫТНОЙ УСТАНОВКИ

Опытная установка представляет собой горизонтальную медную трубу диаметром $d=0,025$ м и длиной $\ell=0,935$ метра. Внутри трубы находится электрический нагреватель 7. Мощность, потребляемая нагревателем, регулируется лабораторным автотрансформатором 8 и измеряется ваттметром 9.

Для измерения температуры поверхности трубы t_w в её стенке заложены хромель-копелевые термопары 1-5, а температура воздуха вдали от трубки t_f измеряется термопарой 6. Термопары 1-6 подключены к шеститочечному автоматическому потенциометру 10. По шкале потенциометра производится отсчет температур в $^{\circ}\text{C}$. Торцы трубки защищены тепловой изоляцией 11.

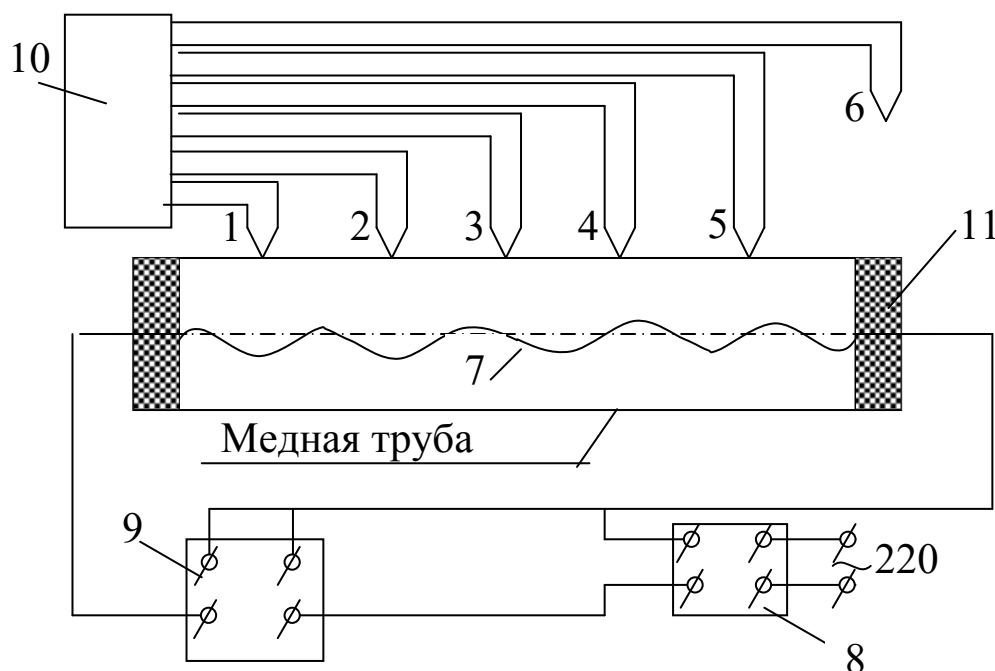


Рис. Опытная установка

Проведение опыта

Установку включает и выключает преподаватель. Тепловой режим трубы регулируется при помощи автотрансформатора 8. Установив мощность нагревателя (40-60 Вт), необходимо следить за тем, чтобы она оставалась неизменной в течение всего опыта. Установка прогревается примерно 50-60 минут. После того как наступит стационарное состояние, записывают показания всех термопар 1-6 в табл.1. Производят три записи показаний термопар, делая интервал между записями 1-2 мин.

Результаты замеров заносят в протокол испытаний.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТА

Тепло, выделяемое электрическим нагревателем, отдается горячей поверхностью трубы окружающей среде двумя путями: лучистым $Q_{\text{л}}$ и конвективным $Q_{\text{к}}$, то есть общий тепловой поток от трубки к воздуху

$$Q = Q_{\text{л}} + Q_{\text{к}} \quad (1)$$

Таблица 1

Протокол испытаний

Номера термопар	1	2	3	4	5	6
Измеряемая температура: 1 замер 2 замер 3 замер						
Средние значения температур						
Мощность электрического нагревателя	$Q =$, Вт					

Искомые в данной работе величины коэффициента излучения C и степени черноты ε следует определить из формулы лучистого теплового потока

$$Q_{\text{л}} = \varepsilon C_0 \left[\left(\frac{T_w}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_f}{100} \right)^4 \right] F, \text{ Вт} \quad (2)$$

где $C = \varepsilon C_0$ - коэффициент излучения, Вт/(м²·К⁴); ε - степень черноты;

$C_0 = 5,67$ - коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела, Вт/(м²·К⁴); F - поверхность теплообмена, м²; T_w - температура поверхности трубки, К, $T_w = 273 + t_w$;

T_f - температура воздуха, К, $T_f = 273 + t_f$.

Если определить конвективную составляющую Q_k по уравнению Ньютона-Рихмана $Q_k = \alpha(t_w - t_f) \cdot F$, (3)

где α - коэффициент теплоотдачи; Вт/(м²·К), определяемый из критериального уравнения для условий свободной конвекции горизонтальной трубы, $Nu_f = 0,5(Gr \cdot Pr)_f^{0,25}$, (4)

где Nu_f - критерий Нуссельта; Gr_f - критерий Грасгофа; Pr_f - критерий Прандтля, то лучистая составляющая определится из уравнения (1)

$$Q_{\text{л}} = Q - Q_k \quad (5)$$

и тогда из уравнения (2) можно будет определить искомые C и ε .

Расчет вести в следующей последовательности:

1. Средняя температура поверхности трубки:

$$t_w = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}{5}, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

2. Поверхность теплообмена трубки с воздухом $F = \pi d l$, м².

3. Теплофизические свойства воздуха выбираются по температуре воздуха t_f по соответствующей таблице:

λ_f - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

ν_f - коэффициент кинематической вязкости, м/с²;

Pr_f - критерий Прандтля;

β_f - коэффициент объемного расширения воздуха, определяемый по формуле,

$$\beta_f = 1/(273 + t_f), \text{ K}^{-1}$$

4. Gr_f - критерий Грасгофа $Gr_f = \frac{gd^3}{\nu_f^2} \cdot \beta_f \cdot \Delta t$,

где g - ускорение силы тяжести, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;

Δt – разность температур, $\Delta t = t_w - t_f$.

5. Критерий Нуссельта находится по уравнению (4)

$$Nu_f = 0,5(Gr \cdot Pr)_f^{0,25}$$

6. Определяем коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = \frac{Nu_f \cdot \lambda_f}{d} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

7. Находим тепловой поток от поверхности трубы, передаваемый конвекцией

$$Q_k = \alpha(t_w - t_f) \cdot F, \text{ Вт}.$$

8. По уравнению (5) вычисляем тепловой поток, передаваемый лучеиспусканием

$$Q_l = Q - Q_k.$$

9. Из уравнения (2) находим степень черноты поверхности трубки

$$\varepsilon = \frac{Q_l}{C_o \left[\left(\frac{T_w}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_f}{100} \right)^4 \right] \cdot F}.$$

10. Коэффициент лучеиспускания окисленной поверхности медной трубки

$$C = \varepsilon C_o, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4).$$

11. Сравниваем табличное и опытные значения степени черноты ε для медной окисленной поверхности.

Таблица 2

Физические параметры сухого воздуха при давлении 101325 Па

$t, ^\circ\text{C}$	10	20	30
$\lambda_f, \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$	0,02551	0,0259	0,0267
$\nu_f, \text{ м}^2/\text{с}$	$14,16 \cdot 10^{-6}$	$15,06 \cdot 10^{-6}$	$16,01 \cdot 10^{-6}$
Pr_f	0,705	0,703	0,701

Отчет по выполненной работе должен содержать:

1. Описание работы.
2. Принципиальную схему установки.
3. Протокол испытаний.
4. Обработку результатов опыта.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Природа лучистой энергии.
2. Классификация электромагнитных колебаний.
3. Основные понятия лучистого теплообмена, плотность теплового потока излучения, излучательная способность E , интенсивность излучения I , абсолютно черное, абсолютно белое, абсолютно прозрачное тела. Серое тело.
4. Законы теплового излучения: Планка, Стефана-Больцмана, Кирхгофа.
5. Лучистый теплообмен между параллельными пластинами.
6. Теплообмен излучением, когда одно тело находится внутри другого.
7. Экранирование, назначение, расчетные формулы.
8. Особенности излучения газов. Какие газы обладают свойством излучения?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Теплотехника/Под ред. А.П.Баскакова.-М.:ООО «ИД Бастет», 2010.-328с.
- 2.Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.-Л.: Энергия, 1980. – 416 с.
- 3.Теплотехнический справочник / Под ред. В.Н.Юренева и М.Д.Лебедева. М.:Энергия, 1976. – 2т. –696 с.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра теплогазоводоснабжения

УТВЕРЖДАЮ
_____ по учебной работе
О.Г. Локтионова
_____ 2015 г.



**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА
ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Методические указания к лабораторной работе по теплотехнике и
теплообмену для студентов технических специальностей

Курск 2015

Составители: Е.М. Кувардина, В.А. Жмакин

УДК 621.1

Рецензент
Доктор технических наук, профессор кафедры ТГВ
Н.С. Кобелев

Определение коэффициента теплопроводности изоляционных материалов: методические указания к лабораторной работе по теплотехнике и тепломассообмену для студентов технических специальностей / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: Е.М. Кувардина, В.А. Жмакин Курск, 2015. 8 с.: ил. 1, табл. 2. Библиогр.: с. 8.

Излагаются методические рекомендации по определению коэффициента теплопроводности изоляционных материалов.

Предназначены для студентов технических специальностей.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать . Формат 60x84 1/16.
Усл.печ. л. Уч.- изд. л. Тираж экз. Заказ. Бесплатно.
Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

Целью работы является углубление знаний по теории теплопроводности, изучение методики экспериментального определения коэффициента теплопроводности изоляционных материалов методом «трубы» и получение навыков в проведении экспериментальных работ.

Задание

1. Найти значение коэффициента теплопроводности исследуемого материала опытным путём.
2. Составить отчет по выполненной лабораторной работе.

Теоретическая часть

Теплопроводность – это процесс распространения тепла при непосредственном соприкосновении частиц с различной температурой. В чистом виде этот процесс возможен лишь в однородных твердых телах. Теплообмен между отдельными частями тела объясняется взаимным обменом кинетической энергии через молекулярные связи, распространением упругих волн, а в металлах - диффузией свободных электронов.

Передача теплоты теплопроводностью связана с наличием разности температур.

Совокупность значений температур во всех точках тела называют температурным полем. Температура в теле может изменяться в направлении одной, двух- и трехкоординатных осей. В соответствии с этим температурное поле называется одно-, двух- и трехмерным. Если температурное поле меняется во времени, то оно называется неустановившимся или нестационарным $t = f(x, y, z, \tau)$, если же не меняется – установившимся или стационарным $t = f(x, y, z)$.

Поверхность, объединяющая точки равной температуры, называется изотермической. Температура в теле изменяется лишь в направлении, пересекающем изотермические поверхности. Наибольшее изменение температуры будет наблюдаться в направлении нормали n к изотермическим поверхностям.

Предел отношения изменения температуры Δt на единицу расстояния по нормали Δn между изотермическими поверхностями называется температурным градиентом, т.е.

$$\lim_{\Delta n \rightarrow 0} \Delta t / \Delta n = \partial t / \partial n = \text{grad} \cdot t, \text{ K/м.}$$

Температурный градиент является вектором, направленным по нормали к изотермической поверхности в сторону возрастания температуры.

Количество теплоты, переносимое через какую-либо изотермическую поверхность в единицу времени, называется тепловым потоком Q , Вт. Тепловой поток, отнесенный к единице площади изотермической поверхности, называется плотностью теплового потока или удельным тепловым потоком q , Вт/м², $q=Q/F$. Величины Q и q являются векторами, направление которых противоположно направлению вектора температурного градиента.

В процессе теплопроводности количество переданного тепла в единицу времени пропорционально температурному градиенту и площади сечения F , перпендикулярного направлению распространения тепла, то есть

$$Q = -\lambda \cdot \frac{dt}{dn} F, \text{ Вт}, \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К), который представляет собой количество теплоты, проходящее в единицу времени через единицу площади изотермической поверхности при температурном градиенте, равном единице. Коэффициент теплопроводности характеризует способность тела проводить тепло.

Для многих материалов достаточно точно зависимость λ от t описывается формулой $\lambda = \lambda_0 [1 + b \cdot t]$, где λ_0 – значение коэффициента теплопроводности при температуре t_0 ; b – постоянная, определяемая опытным путем.

Уравнение (1) является математическим выражением основного закона теплопроводности – закона Фурье.

Для однородной цилиндрической стенки (трубы) длиной ℓ с внутренним диаметром d_1 и внешним диаметром d_2 уравнение (1)

имеет вид

$$Q = -\lambda \cdot \frac{dt}{dr} F = -\lambda \cdot \frac{dt}{dr} 2\pi \cdot r \cdot \ell, \quad (2)$$

где dt/dr – температурный градиент; r – радиус кольцевого слоя толщиной dr ; $F = 2\pi r \ell$ – площадь боковой поверхности цилиндра радиусом r и длиной ℓ , м².

При интегрировании уравнения (2) получаем следующую расчетную формулу:

$$Q = \frac{\pi(t_{w1} - t_{w2})\ell}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}}, \text{ Вт}, \quad (3)$$

где t_{w1} и t_{w2} – температуры внутренней и наружной поверхностей трубы.

Описание опытной установки

Эксперимент по определению λ проводится методом «цилиндра» на установке, принципиальная схема которой дана на рис. 1.

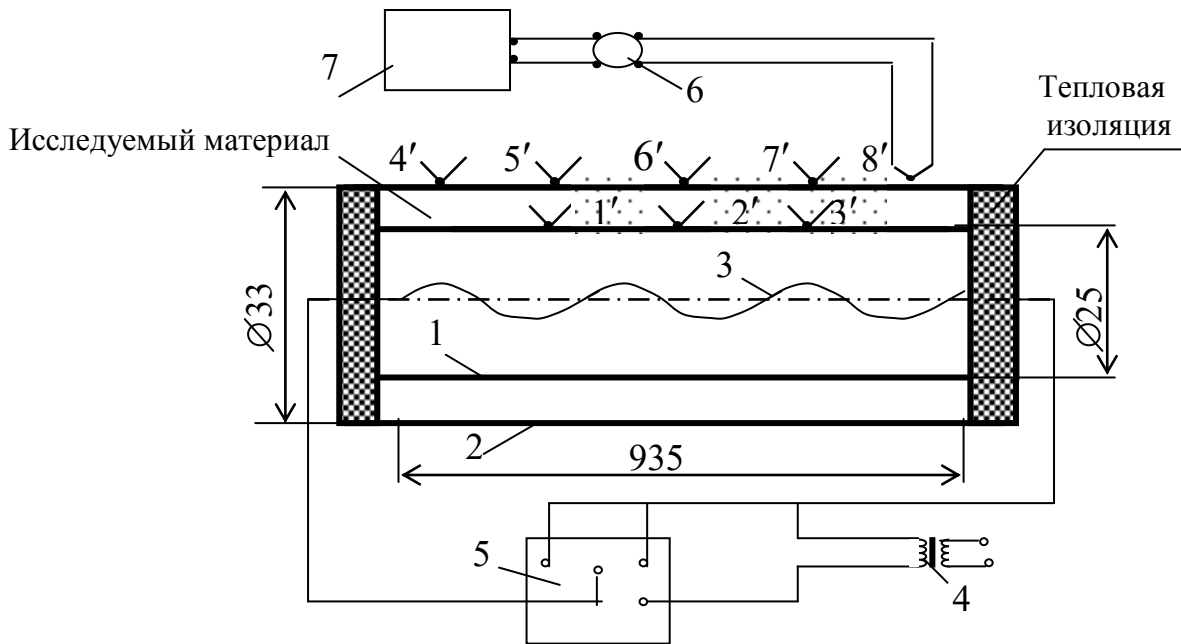


Рис.1. Принципиальная схема экспериментальной установки:
1-внутренняя латунная труба; 2-наружная латунная труба; 3-электрический нагреватель; 4-ЛАТР; 5-ваттметр; 6-переключатель термопар; 7-потенциометр; 1'-8' - спаи хромель-копелевых термопар

Материал, коэффициент теплопроводности которого определяется, засыпается в пространство между трубами 1 и 2. Нагрев материала осуществляется электрическим током, проходящим через нагреватель 3. Мощность, потребляемая нагревателем, регулируется лабораторным автотрансформатором 4 и измеряется ваттметром 5.

Температуры исследуемого материала измеряются термопарами, спаи которых заложены на внутренней и наружной поверхности исследуемого слоя.

Слой исследуемого сыпучего материала (песок) прилегает к поверхности трубы, поэтому термопары, которыми определяется температура внутренней поверхности слоя, заделываются по поверхности трубы 1, а термопары, которыми определяется температура внешней поверхности слоя исследуемого материала, заделываются на внутренней поверхности трубы 2. В действительности выполнить эту операцию не представляется возможным, поэтому термопары 4',5',6',7',8' заделываются на внешней стороне трубы 2. Перепадом температур в стенке пренебрегли, так как металл обладает хорошей теплопроводностью.

Ввиду того что на концевых участках трубы выделяющееся тепло проходит через слой материала не только в направлении, перпендикулярном к поверхности трубы, но и вдоль оси трубы вследствие утечки тепла через торцы трубы, рабочим участком считается средняя часть трубы и температуры в т. 4'-8' служат для контроля утечки тепла.

Все термопары при помощи переключателя 6 поочередно подключаются к потенциометру 7, по шкале которого проводится отсчёт ЭДС термопар в mV.

Проведение опыта

После изучения описания и ознакомления с опытной установкой необходимо заготовить форму протокола для записи наблюдений.

Таблица 1

Протокол испытаний

Мощность электронагревателя Q=	Вт; $t_0=$ °C; $E_0=$ mV							
Номера термопар	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'
ЭДС термопар E_i : 1 замер 2 замер								
Среднее значение E_{icp} , mV								
$E=E_0+E_{icp}$, mV								
Среднее значение температуры t , °C								

С участием преподавателя или лаборанта при помощи автотрансформатора 4 устанавливается режим нагрева (30-50 Вт). Установив мощность нагревателя, необходимо следить за тем, чтобы

она оставалась неизменной в течение всего опыта. При наступлении стационарного режима выполнить 2 замера показаний термопар с интервалом между замерами 1-2 мин. Выключение установки производится преподавателем или лаборантом.

Обработка результатов опыта

Перевод E_i в градусы следует выполнить следующим образом: по градуировочной таблице 2 находим значение ЭДС E_0 , соответствующее температуре окружающей среды t_0 . Величину E_0 складываем с ЭДС, измеренной потенциометром E_i , т.е. находим $E = E_i + E_0$. После этого по величине E по градуировочной таблице 2 находим измеряемую температуру t .

Коэффициент теплопроводности исследуемого материала находится из формулы (3)

$$\lambda = (Q \cdot \ln d_2 / d_1) / [2\pi \cdot \ell \cdot (t_{w1} - t_{w2})], \quad (4)$$

где λ - коэффициент теплопроводности исследуемого материала, Вт/(м·К);

Q - мощность электрического нагревателя, Вт;

ℓ - длина трубки, м;

d_1 и d_2 - внутренний и наружный диаметры изоляционного слоя, м;

t_{w1} и t_{w2} - средние температуры на внутренней и наружной поверхности изоляционного слоя испытуемого материала, °С.

Температуры t_{w1} и t_{w2} определяются как средние арифметические из показаний термопар 1', 2', 3' и 5', 6', 7', т.е.

$$t_{w1} = (t_1 + t_2 + t_3) / 3, \quad t_{w2} = (t_5 + t_6 + t_7) / 3.$$

Полученное значение λ следует отнести к средней температуре исследуемого материала $t = 0,5 \cdot (t_{w1} + t_{w2})$.

Контрольные вопросы

1. Схема экспериментальной установки и порядок проведения опыта.
2. Объясните механизм передачи тепла в процессе теплопроводности.
3. Дайте определения температурного поля и температурного градиента.
4. Приведите основной закон теплопроводности.
5. Что такое коэффициент теплопроводности, его физический смысл, размерность.
6. Термическое сопротивление теплопроводности плоской и цилиндрической стенок.

7. Приведите распределение температуры по толщине плоской и цилиндрической однослойных стенок.
8. Приведите расчетные формулы теплового потока через однослойные и многослойные поверхности.

Таблица 2

Термо-ЭДС термоэлектрических термометров типа хромель-копель при температуре холодного спая 0 °С

Температура, °С	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	mV									
0	0,00	0,07	0,13	0,20	0,26	0,33	0,39	0,46	0,52	0,59
10	0,65	0,72	0,78	0,85	0,91	0,98	1,03	1,11	1,18	1,24
20	1,31	1,38	1,44	1,51	1,57	1,64	1,70	1,77	1,84	1,91
30	1,98	2,05	2,12	2,18	2,25	2,32	2,38	2,42	2,52	2,59
40	2,66	2,73	2,80	2,87	2,94	3,00	3,07	3,14	3,21	3,28
50	3,35	3,42	3,49	3,56	3,63	3,70	3,77	3,84	3,91	3,98
60	4,05	4,12	4,19	4,26	4,33	4,41	4,48	4,55	4,62	4,69
70	4,76	4,83	4,90	4,98	5,05	5,12	5,20	5,27	5,34	5,41
80	5,48	5,55	5,62	5,69	5,76	5,83	5,90	5,97	6,04	6,11
90	6,18	6,25	6,32	6,39	6,46	6,53	6,60	6,67	6,74	6,81

Библиографический список

1. Теплотехника [Текст]: учебник / под ред. А. П. Баскакова. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: БАСТЕТ, 2010. - 328 с.
2. Ерофеев В. Л. Теплотехника: учебник. - М.: Академкнига, 2006. - 456 с.
3. Теплотехника: Учебник / Под ред. В. Н. Луканина. - 4-е изд., испр. - М.: Высшая школа, 2003. - 671 с.
4. Техническая термодинамика и теплотехника [Текст]: учебное пособие / под ред. А. А. Захаровой. - 2-е изд., испр. - М.: Академия, 2008. - 272 с.