

**РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОТКРЫТЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ**

18/1/10

**Одобрено кафедрой
«Теплоэнергетика и водоснабжение
на железнодорожном транспорте»**

ТЕПЛОТЕХНИКА

**для студентов III курса
специальностей**

**190205 ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫЕ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ,
ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ (СМ)
280101 БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ТЕХНОСФЕРЕ (БЖТ)**

ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

**для студентов III курса
специальностей**

**190301 ЛОКОМОТИВЫ (Г)
190302 ВАГОНЫ (В)
190303 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ (ЭПС)**

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОТЕХНИКИ

**для студентов III, IV курсов
специальности**

140104 ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА (ПТ)

ГИДРАВЛИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА

**для студентов IV курса
специальности**

280202 ИНЖЕНЕРНАЯ ЗАЩИТА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ (ЭК)

Методическое руководство к выполнению лабораторных работ



Москва – 2006

Составители: канд. техн. наук, проф. А.И. Мальцев;
канд. техн. наук, проф. Л.М. Дабкин;
канд. техн. наук, Р.А. Серебряков;
ст. преп. Е.В. Драбкина

ТЕПЛОТЕХНИКА
ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОТЕХНИКИ
ГИДРАВЛИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА

Методическое руководство к выполнению
лабораторных работ

Редактор *Д.Н. Тихонычев*
Корректор *В.В. Игнатова*

Компьютерная верстка *О.А. Денисова*

1089.

2000.

Тип. зак.	Тираж . экз.
Подписано в печать 17.10.06	Гарнитура Times
Усл. печ. л. 2,5+2 вкладки (1,0 печ.л.)	Офсет
Допечатка тиража	Формат 60×90 _{1/16}

Издательский центр РГОТУПС,а,
125993, Москва, Часовая ул., 22/2

Участок оперативной печати РГОТУПС,а,
125993, Москва, Часовая ул., 22/2

© Российский государственный открытый технический университет
путей сообщения, 2006

ВВЕДЕНИЕ

Указания предназначены для студентов: III курса специальностей, изучающих дисциплины «Теплотехника», «Термодинамика и теплопередача», «Теоретические основы теплотехники»; IV курса специальностей, изучающих дисциплины «Теоретические основы теплотехники», «Гидравлика и теплотехника».

В сборник включены в основном «классические» лабораторные работы, посвященные узловым моментам указанных дисциплин.

Выполнение лабораторного практикума способствует более глубокому пониманию и усвоению теоретического курса.

Студенты знакомятся также с методикой проведения теплотехнических измерений.

К выполнению лабораторной работы допускаются студенты, предварительно ознакомившиеся с ее основным содержанием по данным методическим указаниям и рекомендуемой литературе.

Конкретное задание по лабораторным работам устанавливает преподаватель.

Указания к лабораторным работам № 1, 2 составлены старшим преподавателем Е.В. Драбкиной, к работам № 3, 6 профессором А.И. Мальцевым, к работе № 4 профессором Л.М. Драбкиным, к работам № 5, 7 старшим преподавателем Р.А. Серебряковым.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИЗУЧЕНИЕ *I-S*-ДИАГРАММЫ ВОДЯНОГО ПАРА

1. Содержание работы

Водяной пар получается при испарении или кипении воды. При кипении температура кипящей жидкости зависит от давления. Пар, находящийся над поверхностью кипящей воды, имеет температуру кипения и называется *насыщенным паром*. Насыщенный пар, содержащий капельную взвешенную влагу, называется *влажным насыщенным паром*. Доля массы сухого насыщенного пара во влажном называется *степенью сухости пара* и обозначается x . Доля влаги во влажном насыщенном паре называется *влажностью пара* ($1 - x$).

$$x = \frac{m_{\text{п}}}{m_{\text{п}} + m_{\text{в}}}.$$

Если испарить всю взвешенную в паре влагу, то пар становится *сухим насыщенным*. Сухой насыщенный пар всегда имеет температуру кипения. Нагревание сухого насыщенного пара вызывает повышение его температуры, и пар становится *перегретым*.

***i-s*-диаграмма.** Водяной пар — это реальный газ, поэтому для решения практических задач, связанных со свойствами водяного пара (рис. 1, см. вкладку), удобно пользоваться *i-s*-диаграммой водяного пара, в которой по оси абсцисс откладываются значения энтропии s , а по оси ординат — энтальпии i . Она построена по данным таблиц водяного пара. Пограничная кривая $x = 1$ соответствует состоянию сухого насыщенного пара. Ниже ее — зона влажного насыщенного пара, выше — зона перегретого пара.

На диаграмме нанесены линии постоянного давления — *изобары*. В области влажного пара изобары проходят слабо расходящимися прямыми наклонными линиями. В области перегретого пара изобары поднимаются слева направо, круче изохор насыщенного пара, и обращены выпуклостью вниз.

Изотермы в области влажного пара совпадают с *изобарами*, а в области перегретого пара идут слева направо, незначительно поднимаясь вверх. Если требуется определить температуру в области влажного насыщенного пара, зависящую от давления, надо найти точку пересечения заданной *изобары* с верхней пограничной кривой. *Изотерма*, начинающаяся в этой точке, и будет искомой температурой влажного насыщенного пара.

В области влажного насыщенного пара имеются линии постоянной степени сухости пара x , берущие начало от критической точки. На верхней пограничной кривой степень сухости $x = 1$, на нижней $x = 0$.

Также имеются линии постоянного удельного объема $v = \text{const}$ — *изохоры*, представляющие собой кривые, аналогичные *изобарам*, но имеющие более крутой изгиб. Они нанесены пунктирной линией.

С помощью *i-s*-диаграммы водяного пара можно определить по любым двум известным параметрам все основные термодинамические величины для любого состояния пара. На *i-s*-диаграмме могут быть изображены основные термодинамические процессы и установлены происходящие при их протекании изменения состояния пара.

2. Порядок проведения работы и обработки результатов измерений

1. При заданном состоянии пара (p_1 и t_1) найти на диаграмме соответствующую точку и определить недостающие параметры: s_1 , v_1 , i_1 , u_1 . [Значения p_1 и t_1 задает преподаватель.]

2. **Изохорный процесс.** При заданном состоянии пара (p_1 и x_1) — точка 1, требуется изохорным процессом подвода тепла довести пар до температуры t_2 . Для этого из точки 1 идем по *изохоре* v_1 до ее пересечения с *изотермой* t_2 в точке 2. В *изохорном* процессе при сообщении тепла влажному пару повышается его давление и температура. При этом влажность пара уменьшается, и он превращается в сухой насыщенный, а затем в перегретый. При отводе теплоты от перегретого пара процесс идет в обратном направлении.

3. **Изобарный процесс.** Задано состояние пара — точка 1 (p_1 и x_1). Конечное состояние характеризуется температурой t_2 . Из точки 1 идем по изобаре p_1 до точки ее пересечения с изотермой t_2 в точке 2. В этом процессе при сообщении тепла влажному пару уменьшается его влажность и он на пограничной кривой переходит в сухой насыщенный, причем температура его остается постоянной и равной $t_1 = t_n$. При дальнейшем подводе теплоты пар перегревается. При отводе теплоты процесс идет в обратном направлении.

4. **Изотермический процесс.** При данном состоянии пара (p_1 и x_1) требуется в изотермическом процессе достичь давления p_2 . До пограничной кривой изотерма совпадает с изобарой, потом отклоняется вправо и пересекается в точке 2 с изобарой p_2 . В изотермическом процессе при сообщении тепла влажному пару его объем увеличивается, он превращается сначала в сухой насыщенный, а затем в перегретый. В области влажного пара этот процесс полностью совпадает с изобарным, а в области перегрева давление пара при изотермическом расширении понижается.

5. **Адиабатный процесс.** Задано состояние — точка 1 (p_1 и t_1). Требуется провести адиабатный процесс расширения до давления p_2 . Адиабатный процесс протекает при постоянном значении энтропии, поэтому он изображается вертикалью, опущенной из точки 1 до пересечения с изобарой p_2 в точке 2. При адиабатном расширении давление и температура пара понижается, перегретый пар при этом переходит в сухой насыщенный и затем во влажный, при сжатии влажного пара процесс идет в обратном направлении.

6. **Дросселирование пара.** Резкое сужение проходного сечения в трубопроводе (дроссель — клапан, заслонка, калиброванная шайба и т.п.) снижает давление пара при прохождении его через это сужение; давление пара за местом сужения p_2 всегда меньше давления p_1 перед сужением. Потеря давления тем больше, чем больше это сужение. Такое понижение давления называется *дросселированием* (*мятием* или *редуцированием*). Процесс дросселирования водяного пара условно изображается горизонтальной прямой, параллельной оси s .

7. По заданию преподавателя изобразить процессы на i - s -диаграмме, найти значения всех необходимых величин в этих процессах и занести их в табл. 1.

Таблица 1

Величины	Процесс				
	Изобарный	Изохорный	Изотермический	Адиабатный	Дросселирование
p_1					
t_1					
v_1					
x_1					
p_2					
t_2					
v_2					
x_2					
i_1					
i_2					
s_1					
s_2					
u_1					
u_2					
Δi					
Δs					
Δu					
a					
q_{1-2}					

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОСТОЯНИЯ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА С ПОМОЩЬЮ ПСИХРОМЕТРА

1. Содержание работы

Влажный воздух представляет собой смесь сухого воздуха с водяным паром. Влажный воздух, содержащий максимальное количество водяного пара при данной температуре, называется *насыщенным*. Воздух, в котором не содержится максимально возможное при данной температуре количество водяного пара, называется *ненасыщенным*. Ненасыщенный влажный воздух состоит из смеси сухого воздуха и перегретого водяного пара, а насыщенный влажный воздух — из сухого воздуха и насыщенного водяного пара. При давлениях, близких к атмосферному, парциальное давление водяного пара в воздухе обычно невелико, поэтому для влажного воздуха можно применять законы и формулы, справедливые для смеси идеальных газов.

Величинами, широко применяемыми в технических расчетах для характеристики состояния влажного воздуха, является *абсолютная и относительная влажность, влагосодержание, энтальпия* и другие.

Давление влажного воздуха, согласно закону Дальтона, равно:

$$p_v = p_{св} + p_n,$$

где $p_{св}$ и p_n — парциальные давления соответственно сухого воздуха и пара.

Парциальное давление p_n можно определить из таблиц насыщенного пара по температуре точки росы, т.е. по той температуре, до которой нужно охладить ненасыщенный воздух при постоянном влагосодержании, чтобы он стал насыщенным. Соответственно, если охладить ненасыщенный воздух, то при некоторой температуре он станет насыщенным. Эта температура и есть *температура точки росы*. При дальнейшем охлаждении влажного воздуха избыток влаги выпадает в виде росы.

Абсолютной влажностью воздуха называют массу (кг) водяного пара в 1 м³ влажного воздуха, а это как известно, есть плотность пара ρ при его парциальном давлении и температуре влажного воздуха. Если влажный воздух содержит максимально возможное количество водяного пара при данной температуре, то его называют *насыщенным*. В этом состоянии абсолютная влажность будет равна плотности сухого насыщенного пара ρ'' при температуре воздуха.

Если $\rho < \rho'$, то воздух не насыщен влагой.

Для оценки содержания водяного пара во влажном воздухе вводят понятие *относительная влажность* ϕ , которой называют отношение массы водяного пара, содержащейся в 1 м³ влажного воздуха (ρ), к максимально возможному количеству пара в 1 м³ воздуха (ρ'') при данной температуре и том же давлении насыщения, т.е.

$$\phi = \rho / \rho''.$$

Влагосодержанием d [г/кг с.в.] влажного воздуха называют количество водяного пара в граммах, приходящегося на 1 кг сухого воздуха. Нетрудно видеть, что влагосодержание есть отношение массового количества водяного пара M_n , содержащегося во влажном воздухе, к массовому количеству сухого воздуха $M_{св}$, т.е.

$$d = M_n / M_{св}.$$

Для удобства расчетов *энтальпию* влажного воздуха также относят к 1 кг сухого воздуха. Энтальпия влажного воздуха, которая обычно обозначается буквой i , равна сумме энтальпий 1 кг сухого воздуха $i_{св}$ и энтальпии i_n , содержащихся в этом воздухе d кг водяного пара, т.е.

$$i = i_{св} + i_n \cdot d \text{ [кДж/кг с.в.]}. \quad (1)$$

i-d-диаграмма влажного воздуха. Характеристики влажного воздуха могут быть определены по таблицам насыщенного водяного пара и соответствующим формулам. Однако, определение характеристик влажного воздуха и расчеты, связанные с изменением его состояния, значительно упрощаются и становятся нагляднее, если используются графические методы с применением *i-d-диаграммы* влажного воздуха (рис. 2, см. вкладку).

Такая диаграмма обычно дается для атмосферного давления влажного воздуха $P = 745$ мм рт. ст., что соответствует среднему годовому значению барометрического давления в центральных районах России. Однако эта диаграмма может быть использована и при небольших отклонениях от этого значения давления.

В этой диаграмме по оси ординат отложены значения энтальпии i влажного воздуха, отнесенные к 1 кг сухого воздуха, а по оси абсцисс — влагосодержание d в граммах на 1 кг сухого воздуха. Для лучшего использования площади диаграммы координатные оси расположены под углом 135° друг к другу. Вследствие этого линии $i = \text{const}$ проходят под углом 45° к горизонтали. Линии $d = \text{const}$ представляют собой вертикальные прямые. На диаграмме проведены также наклонные линии изотерм влажного воздуха — $t = \text{const}$, являющиеся почти прямыми, и линии постоянной относительной влажности ϕ . Кривая $\phi = 100\%$ является пограничной кривой. В состояниях, соответствующих точкам на этой кривой, влажный воздух будет насыщенным. Область диаграммы над кривой $\phi = 100\%$ будет областью насыщенного воздуха. В этой области в воздухе находится перегретый пар, парциальное давление и плотность которого меньше максимально возможных при данной температуре влажного воздуха.

На диаграмме обычно пунктиром нанесены наклонные линии постоянной температуры $\tau = \text{const}$ мокрого термометра, под которой понимают температуру, приобретаемую водой, если поверхность ее обдувается потоком влажного ненасыщенного воздуха. На i - d -диаграмме изотермы $t = \text{const}$ и $\tau = \text{const}$, соответствующие одному и тому же значению температуры, пересекаются на линии $\phi = 100\%$.

Очевидно, что процесс нагревания влажного воздуха происходит без изменения его влагосодержания d , поэтому на диаграмме он изображается вертикальным отрезком. Другим типичным процессом является процесс испарения влаги, когда она переходит в воздух, насыщая его влагой. Можно показать, что при этом энтальпия воздуха i не изменяется, поэтому такой процесс соответствует линии $i = \text{const}$.

Психрометр. Психрометр — прибор для определения влажности воздуха. Он состоит из двух ртутных термометров — *сухого* и так называемого *мокрого*, ртутный шарик, которого обер-

нут тканью, смачиваемой водой. Психрометр имеет вентилятор, приводом которого является пружинный механизм или миниатюрный электродвигатель. Для предотвращения притока внешней теплоты ртутные шарики термометров прибора экранируются специальными трубками. Когда поток влажного воздуха, засасываемый при работе вентилятора, обдувает ртутные шарики термометров, сухой термометр показывает действительную температуру исследуемого влажного воздуха, а мокрый — температуру, которую имеет вода, содержащаяся во влажной ткани, покрывающей ртутный шарик термометра, т.е. с некоторой степенью приближения температуру, показываемую мокрым термометром.

2. Порядок проведения работы и обработки результатов измерений

Перед проведением опыта ткань, которой обернут ртутный шарик одного из двух термометров психрометра, смачивают водой при помощи специальной резиновой груши. Затем заводят пружинный механизм или электродвигатель вентилятора психрометра включают в электрическую сеть. При работе вентилятора в кольцевые зазоры между ртутными шариками термометров и экранирующими трубками засасывается исследуемый воздух. При постоянном потоке воздуха температура мокрого термометра вследствие испарения воды на поверхности ртутного шарика начинает понижаться. Отсчет показаний по сухому и мокрому термометрам производят в момент, когда температура, показываемая мокрым термометром, достигнет минимума и будет оставаться неизменной во времени.

По полученным во время опыта значениям температур сухого t и мокрого τ термометров психрометра на диаграмме находят соответствующие изотермы и точку их пересечения. Эта точка и определит состояние исследуемого влажного воздуха. Для этого состояния влажного воздуха на диаграмме определяют относительную влажность ϕ , влагосодержание d и энтальпию i . Значения этих величин заносят в табл. 2.

Таблица 2

$t, ^\circ\text{C}$	$\tau, ^\circ\text{C}$	$\phi, \%$	$d, \text{г/кг с.в.}$	$i, \text{кДж/кг с.в.}$

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕГО ЗНАЧЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПОЛИТРОПНОГО ПРОЦЕССА СЖАТИЯ ИНДИКАТОРНОЙ ДИАГРАММЫ ПОРШНЕВОГО КОМПРЕССОРА

1. Содержание работы

Характер протекания действительных процессов в цилиндре поршневой машины можно изучить, рассматривая индикаторную диаграмму, полученную во время работы машины с помощью прибора, называемого *индикатором*.

На рис. 3 изображена индикаторная диаграмма реального поршневого одноступенчатого воздушного компрессора. Она снимается механическим пружинным индикатором и показывает изменение давления воздуха в рабочей полости цилиндра в зависимости от объема газа в цилиндре.

В данной работе для индицирования компрессора ВКЗ-6 использовался индикатор типа МИ-2. Один датчик индикатора пружинного типа устанавливается на клапанной крышке компрессора и сжатие пружины пропорционально давлению в цилиндре, другой датчик связан с ходом поршня и дает сигнал, пропорциональный объему цилиндра.

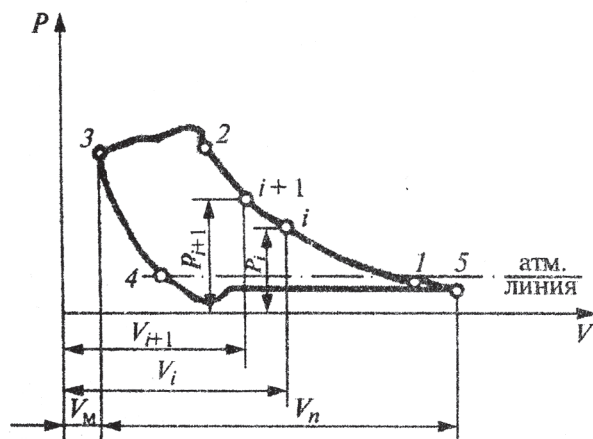


Рис. 3

Кривая 1-2 изображает процесс сжатия воздуха, происходящий при закрытых всасывающем и нагнетательном клапанах компрессора. В реальном компрессоре этот процесс протекает при довольно сложных условиях теплообмена. Поэтому он принимается политропным. Уравнение линии процесса в системе координат PV имеет вид $PV^n = \text{const}$, где n — показатель политропы.

В реальном компрессоре во время процесса сжатия интенсивность теплообмена и направление потока теплоты изменяются, поэтому значение показателя политропы также меняется вдоль кривой 1-2. В начале сжатия температура свежего воздуха ниже, чем температура поршня и стенок цилиндра, и теплота подводится от них к воздуху, при этом значение показателя политропы n больше показателя адиабаты k ($n > k$). В процессе сжатия температура воздуха возрастает и в некоторый момент сравнивается с температурой поршня и стенок цилиндра. В этот момент $n = k$. Процесс сжатия усложняется и другими факторами, в том числе утечками воздуха из цилиндра. Описать аналитически действительный процесс сжатия воздуха в компрессоре с учетом влияния всех факторов не представляется возможным. По этой причине в расчетах описанный процесс принимают политропным со средним значением показателя политропы $n_{\text{ср}}$. При работе компрессора с охлаждаемым цилиндром среднее значение показателя политропного процесса сжатия должно быть больше единицы (изотермическое сжатие), но меньше показателя k (адиабатное сжатие), т.е. $1 < n_{\text{ср}} < k$.

Среднее значение показателя $n_{\text{ср}}$ обычно определяют как среднее арифметическое значение показателей политроп для малых отрезков процесса, в данном случае линии 1-2. Показатель политропы отдельного отрезка находят аналитически по координатам двух крайних точек рассматриваемого отрезка, обозначают их i и $i + 1$. На этом отрезке значение n принимается постоянным.

Запишем для крайних точек отрезка уравнение политропы:

$$P_i V_i^n = P_{i+1} V_{i+1}^n.$$

Логарифмируя его, получим

$$\lg P_i + n \lg V_i = \lg P_{i+1} + n \lg V_{i+1},$$

откуда

$$n = \frac{\lg P_{i+1} - \lg P_i}{\lg V_i - \lg V_{i+1}} = \frac{\lg \left(\frac{P_{i+1}}{P_i} \right)}{\lg \left(\frac{V_i}{V_{i+1}} \right)}. \quad (1)$$

Нетрудно показать, что значения P_i , V_i , P_{i+1} , V_{i+1} можно выбрать непосредственно из индикаторной диаграммы в миллиметрах, не считаясь с масштабом координат.

2. Порядок проведения работы и обработки результатов

Для выполнения лабораторной работы студенту выдается индикаторная диаграмма, снятая с компрессора ВКЗ-6 при производном режиме его работы. Вначале на диаграмме определяют положение осей координат P и V . Для этого диаграмму следует аккуратно наклеить на лист разлинованной бумаги строго горизонтально, ориентируясь на положение «атмосферной» линии (см. рис. 3). Для нахождения положения оси давлений вычисляют длину отрезка V_m , мм, условно выражающего объем мертвого пространства в цилиндре компрессора (см. рис. 3). Для указанного компрессора, принимая коэффициент мертвого пространства

$$a = \frac{V_m}{V_h} = 0,08, \text{ получают } V_m = a V_h = 0,08 V_h,$$

где V_h — длина диаграммы, мм, выражающая рабочий объем цилиндра.

Поэтому для проведения оси давлений сначала на диаграмме через крайнюю левую точку проводят вертикальную вспомогательную линию, затем линейкой снимают с диаграммы значе-

ние V_h (в мм), вычисляют по приведенной выше формуле значение V_m , а потом налево от вспомогательной линии откладывают по линейке в мм величину V_m и проводят вертикальную линию — это и будет положение оси давления.

Положение оси объемов определяют в следующем порядке. Во-первых, для привязки давления индикатор на диаграмме рисует линию, пропорциональную наружному атмосферному давлению («атмосферную» линию на рис. 3). Если предположить, что это давление равно 1 бар и принять во внимание, что при работе индикатора была установлена пружина датчика давления, сжимающаяся при давлении 1 бар на 4 мм, то очевидно, что ось объемов проходит ниже «атмосферной» линии диаграммы на величину масштаба давлений, т.е. на 4 мм. Проведя эту линию, заканчивают этим привязку диаграммы к осям координат.

Далее линию сжатия 1-2 диаграммы делят произвольно на 4 отрезка примерно одинаковой длины. В крайних точках каждого отрезка измеряют линейкой длину величин p и V и заносят в табл. 3. Для каждого отрезка линии сжатия по формуле (1) определяют показатель n_p , значение которого также заносят в табл. 3.

Таблица 3

Величины	Отрезки			
	1	2	3	4
p_{i+1} , мм				
p_i , мм				
V_i , мм				
V_{i+1} , мм				
$\lg p_{i+1}$				
$\lg p_i$				
$\lg V_i$				
$\lg V_{i+1}$				
n_i				

Подсчитывают средний показатель политропы сжатия 1–2

$$n_{\text{ср}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m n_i$$

где m — число отрезков;

n_i — показатели политропы отрезков линии сжатия.

По величине $n_{\text{ср}}$ делают вывод об эффективности работы системы охлаждения испытуемого компрессора.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИКЛА ХОЛОДИЛЬНОЙ ПАРОКОМПРЕССИОННОЙ УСТАНОВКИ

Цель работы

Экспериментальное исследование цикла холодильной установки и определение ее холодопроизводительности и холодильного коэффициента.

Описание установки

Схема установки приведена на рис. 4. Установка содержит компрессор, конденсатор, дроссель и испаритель. Рабочим телом является фреон Ф12, пары которого сжимаются компрессором до давления p_2 и температуры t_2 (см. диаграмму $p-i$ на рис. 5). В состоянии т. 2 на входе в конденсатор температура паров фреона оказывается выше температуры окружающего воздуха, поэтому пары отдают тепло в окружающую среду, а сами охлаждаются до состояния т.3. В дроссельном вентиле давление паров насыщенного фреона понижается до p_4 , а температура — до t_4 . В этом состоянии пар поступает в испаритель, где испаряется, отнимая тепло от окружающего воздуха. Измерение температуры осуществляется четырьмя датчиками температуры, установленными после испарителя (на входе в компрессор),

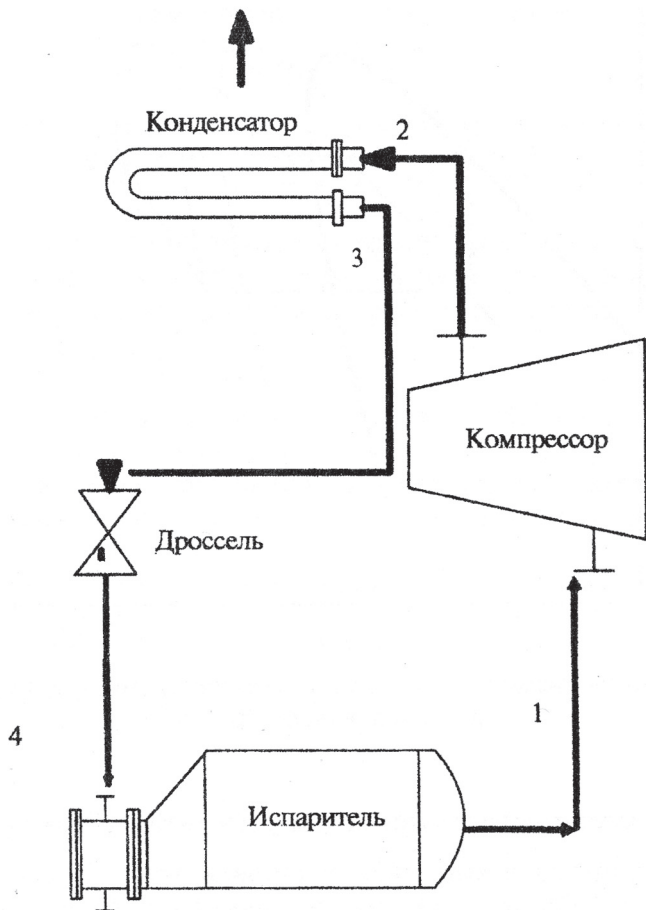


Рис. 4. Схема парокомпрессионной холодильной установки

за компрессором, перед и после дросселя (см. рис.4.). Давление паров фреона измеряется на всасывающей и нагнетательной стороне компрессора. Все датчики подключены к компьютеру, что позволяет наблюдать за происходящими процессами в реальном масштабе времени. На экран монитора выведена также схема данной установки.

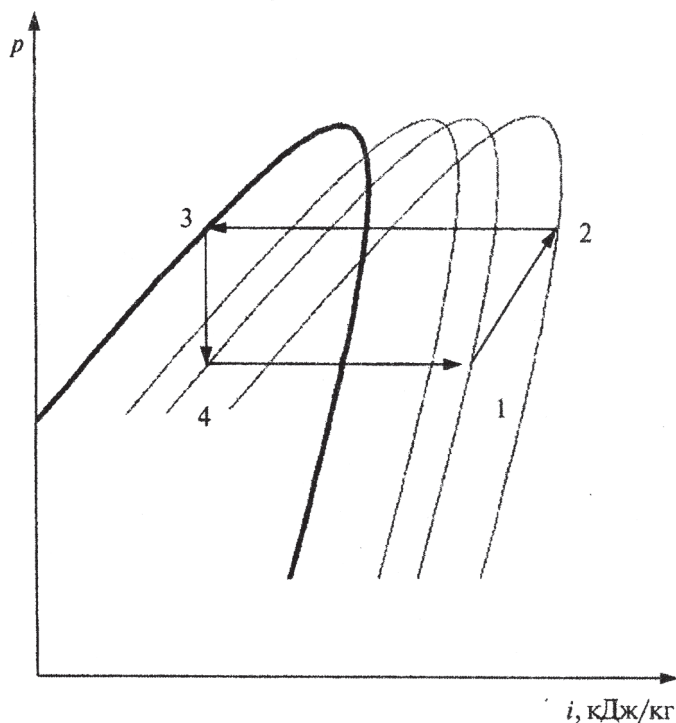


Рис.5. Термодинамический цикл парокомпрессионной холодильной установки в $p-i$ диаграмме

Цикл установки и обработка результатов измерений

Термодинамический цикл установки (рис. 5) состоит из адиабатного процесса сжатия пара фреона в компрессоре 1-2, изобарного охлаждения пара (в том числе его конденсации) в процессе 2-3, протекающем в конденсаторе, процесса дросселирования 3-4 и изобарного процесса подвода тепла (парообразования) 4-1 в испарителе.

Теоретическая удельная затраченная работа на привод компрессора, кДж/кг:

$$A = i_2 - i_1.$$

Удельная холодопроизводительность установки, кДж/кг:

$$Q = i_1 - i_3.$$

Холодильный коэффициент установки (теоретический):

$$\varepsilon = i_1 - i_4/i_2 - i_1,$$

где i_1, i_2 — энтальпии пара соответственно в начале и конце адиабатного сжатия в компрессоре, кДж/кг, (см. рис. 5);

i_3, i_4 — энтальпии до и после дроссельного вентиля ($i_3 = i_4$), кДж/кг.

Энтальпии находятся с помощью диаграммы $p-i$ фреона Ф12.

Мощность компрессора, N , кВт, определяется по показанию ваттметра и вводится в расчет с клавиатуры компьютера.

Расход рабочего тела в установке, кг/с:

$$m = N/A.$$

Холодопроизводительность установки, кВт:

$$Q = m \cdot Q_0.$$

Результаты измерений заносятся в табл. 4.

Таблица 4

T_1	T_2	T_3	T_4	p_1	p_2	A	Q	N	m

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА МЕТОДОМ ТРУБЫ

Теплопроводностью называется явление передачи теплоты от более нагретых частиц тела к менее нагретым путем непосредственного их соприкосновения, обусловленное тепловым движением молекул или атомов вещества, а в металлах — свободных электронов.

Изучая явление теплопроводности в твердых телах, французский ученый Фурье установил закон распространения теплоты путем теплопроводности, по которому количество переданной теплоты, отнесенное к единице площади и единице времени (удельный тепловой поток), прямопропорционально температурному градиенту, т.е.

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} = -\lambda \text{ grad } t, \quad (1)$$

где λ — коэффициент теплопроводности.

Температурным градиентом называется предел отношения изменения температуры Δt между соседними изотермическими поверхностями к расстоянию между ними по нормали Δn (рис. 6).

$$\lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta t}{\Delta n} = \frac{\partial t}{\partial n} = \text{grad } t. \quad (2)$$

Удельный тепловой поток q и температурный градиент $\text{grad } t$ являются величинами *направленными*, т.е. *векторными*. поскольку оба этих вектора направлены по одной прямой (нормали) и имеют противоположные направления (см. рис. 6), то в формуле (1) стоит знак «минус».

Коэффициент теплопроводности равен количеству теплоты, которое проходит через стенку площадью 1 м^2 в единицу времени при разности температур на поверхностях стенки в один

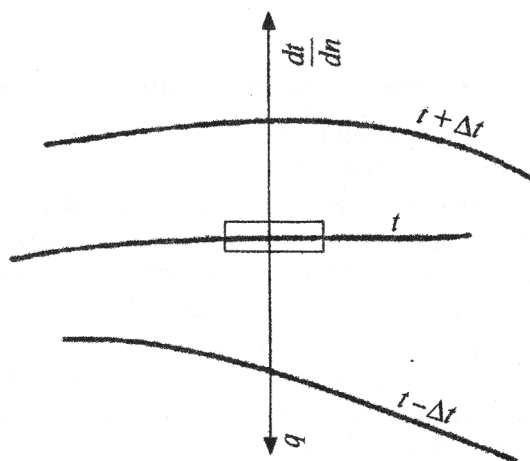


Рис. 6

градус при толщине стенки 1 м. Соответственно, этот коэффициент характеризует собой способность вещества проводить теплоту. Значение коэффициента теплопроводности различных материалов находят обычно опытным путем.

Для определения коэффициента теплопроводности на стационарном режиме пользуются методами плиты, трубы и шара. В данной лабораторной работе использован метод трубы, основанный на теплопроводности цилиндрической стенки.

Из математического выражения закона Фурье (1) выводится расчетная формула, по которой определяют количество теплоты в джоулях, проходящее через цилиндрическую стенку в течении секунды (мощность теплового потока) при установившемся режиме

$$Q = \frac{2\pi\lambda l(t_1 - t_3)}{\ln \frac{d_2}{d_1}}, \quad (3)$$

где l — длина цилиндрической стенки, м;

t_1 и t_3 — температура внутренней и наружной поверхностей стенки;

d_1 и d_2 — внутренний и наружный диаметры стенки.

Описание лабораторной установки

На рис. 7 изображена схема лабораторного стенда (см. схема лабораторной работы № 5). На стальную трубу диаметром $d_1 = 62$ мм нанесен слой испытуемого изоляционного материала 1. Средний наружный диаметр изоляционного слоя $d_2 = 125$ мм. Внутри трубы по оси расположен электрический нагреватель 2 из нихромовой проволоки, которая питается электрическим током через регулятор напряжения 3 (P_n).

Температура испытуемого изоляционного материала измеряется с помощью шести термоэлектрических термометров. Три из них установлены в 21 см от левого края трубы: на внутренней поверхности испытуемого материала — t''_1 , на наружной поверхности t''_3 и между ними — в середине слоя изоляции t'_2 . Другие три — в 21 см от правого края трубы t'_1 , t'_2 и t'_3 .

В данной установке использованы хромель-копелевые термоэлектрические термометры (ХК). Термо-ЭДС этих термометров измеряется многоканальным микропроцессорным измерителем температуры 4 (Т). Электрическая мощность нагревателя измеряется ваттметром 5 (W).

Порядок проведения работы и обработки результатов

Регулятором напряжения 3 установить произвольное, но не слишком большое напряжения на концах основного нагревателя.

Измерить термо-ЭДС термометров t'_1 , t'_2 , t'_3 , t''_1 , t''_2 , t''_3 и электрическую мощность основного нагревателя при установившемся стационарном режиме. Электрическую мощность W_3 определить по показаниям ваттметра с учетом постоянной прибора.

ПРИМЕЧАНИЕ. Считается, что температурное поле будет стационарным, если измеряемые температуры остаются неизменными в течение 16+20 ч. Условия проведения опыта не позволяют выполнить это требование. Поэтому опытная установка находится постоянно в собранном виде. Включается она в электрическую сеть за 1,5+2 ч до начала лабораторной работы. Следовательно, сокращая время опыта, в данном случае вносим некоторую условность в проводимый эксперимент.

Схема лабораторной работы № 6

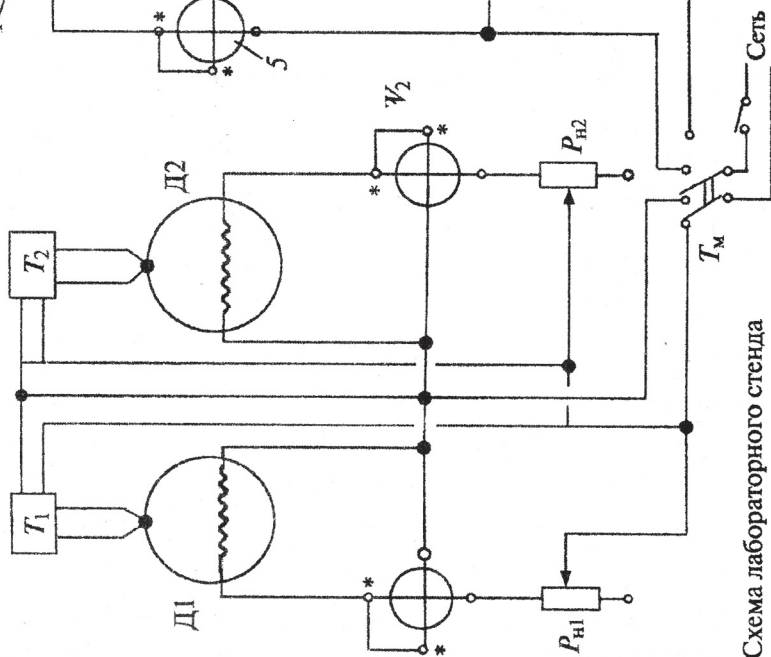
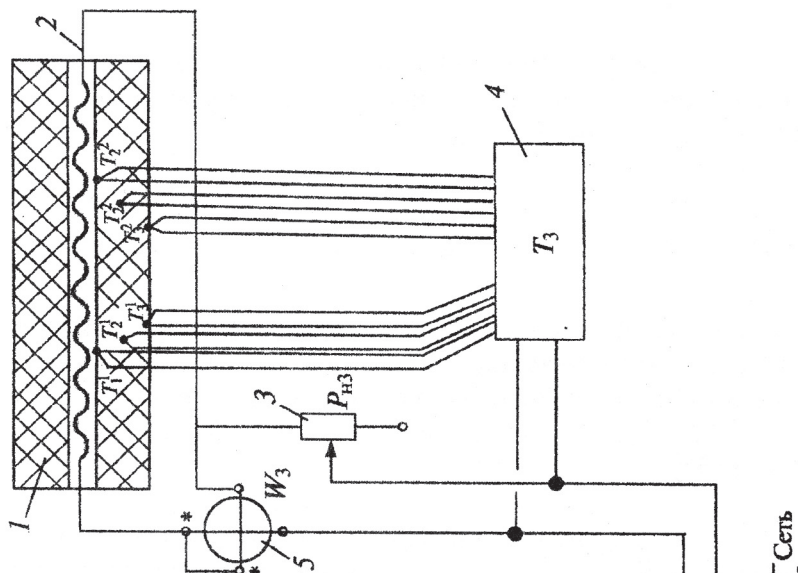


Рис. 7. Схема лабораторного стенда

Схема лабораторной работы № 5.



Опытные данные и результаты их обработки сводят в табл. 6.

Таблица 6

$t_{1,}^1$, °C	$t_{1,}^2$, °C	$t_{1,}^3$, °C	$t_{2,}^1$, °C	$t_{2,}^2$, °C	$t_{2,}^3$, °C	W , Вт	Q , Вт	t_{cp} , °C	λ , Вт/(м·К)

Измерения провести на нескольких уровнях тепловой мощности и сделать вывод о зависимости λ используемого материала от температуры.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЛУЧЕИСПУСКАНИЯ ТВЕРДОГО СЕРОГО ТЕЛА И СТЕПЕНИ ЕГО ЧЕРНОТЫ

Содержание работы

Тепловым излучением (лучеиспусканием) называется явление переноса тепловой энергии в виде электромагнитных волн. Лучеиспускание свойственно всем телам. Во время нагревания часть их тепловой энергии неизбежно превращается в лучистую, количество которой зависит от температуры тела.

Для теплового излучения существует ряд основных законов, одним из которых является **закон Стефана — Больцмана**. Согласно этому закону, количество энергии, изучаемое абсолютно черным телом, пропорционально четвертой степени его абсолютной температуры

$$E_0 = \sigma_0 T^4 = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}. \quad (5)$$

Величина σ_0 называется *константой излучения*, а C_0 — *коэффициентом лучеиспускания*. Для абсолютно черного тела коэффициент лучеиспускания

$$C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4).$$

Опытные данные и результаты их обработки сводят в табл. 6.

Т а б л и ц а 6

$t_1^1, ^\circ\text{C}$	$t_1^2, ^\circ\text{C}$	$t_1^3, ^\circ\text{C}$	$t_2^1, ^\circ\text{C}$	$t_2^2, ^\circ\text{C}$	$t_2^3, ^\circ\text{C}$	$W, \text{Вт}$	$Q, \text{Вт}$	$t_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$

Измерения провести на нескольких уровнях тепловой мощности и сделать вывод о зависимости λ используемого материала от температуры.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЛУЧЕИСПУСКАНИЯ ТВЕРДОГО СЕРОГО ТЕЛА И СТЕПЕНИ ЕГО ЧЕРНОТЫ

Содержание работы

Тепловым излучением (лучеиспусканием) называется явление переноса тепловой энергии в виде электромагнитных волн. Лучеиспускание свойственно всем телам. Во время нагревания часть их тепловой энергии неизбежно превращается в лучистую, количество которой зависит от температуры тела.

Для теплового излучения существует ряд основных законов, одним из которых является **закон Стефана — Больцмана**. Согласно этому закону, количество энергии, изучаемое абсолютно черным телом, пропорционально четвертой степени его абсолютной температуры

$$E_0 = \sigma_0 T^4 = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}. \quad (5)$$

Величина σ_0 называется *константой излучения*, а C_0 — *коэффициентом лучеиспускания*. Для абсолютно черного тела коэффициент лучеиспускания

$$C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4).$$

Для серых тел он меньше коэффициента лучеиспускания абсолютно черного тела: $C < C_0$. Кроме того, он зависит от температуры.

Для оценки излучательной способности серых тел вводят понятие степени черноты поверхности тела ε , представляющей собой отношение излучательной способности серого тела E к излучательной способности абсолютно черного тела E_0 . При одинаковой температуре поверхностей тел величину ε находят по отношению коэффициентов лучеиспускания

$$\varepsilon = \frac{C}{C_0}. \quad (6)$$

Следовательно, степень черноты характеризует собой излучательную способность серого тела по отношению к излучению абсолютно черного тела при той же температуре.

Одним из самых простых методов определения коэффициента лучеиспускания является метод сравнения теплоотдачи испытуемого тела с теплоотдачей абсолютно черного или серого тела с известной степенью черноты поверхности. Этот метод и использован в данной работе.

В опытной установке взяты два одинаковых по форме, чистоте обработки и размерам тела D_1 и D_2 (см. рис. 7 — схема лабораторной работы № 6) из разного материала, имеющих температуры выше температуры окружающей среды. Они отдают теплоту как путем конвекции, так и путем излучения. В этом случае полное количество энергии, отдаваемое каждым телом окружающей среде, равно сумме количеств теплоты, отдаваемых конвекцией и лучеиспусканием

$$\begin{aligned} Q_1 &= Q_{1к} + Q_{1л}; \\ Q_2 &= Q_{2к} + Q_{2л}. \end{aligned} \quad (7)$$

При одинаковых условиях теплообмена и равных температурах поверхностей тел количество теплоты, отдаваемое каждым из тел конвекцией, одинаково: $Q_{1к} = Q_{2к}$. Тогда разность полных расходов энергии при установившемся режиме и определит разность излучательной способности тел, а именно:

$$Q_1 - Q_2 = Q_{1л} - Q_{2л}.$$

В рассматриваемом случае на основании закона Стефана — Больцмана можно написать:

$$Q_{1л} - Q_{2л} = Q_1 - Q_2 = (C_1 - C_2) \left[\left(\frac{T_{пов}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_в}{100} \right)^4 \right] F, \quad (8)$$

где C_1 — коэффициент лучеиспускания твердого тела, степень черноты ϵ_1 которого известна ($C_1 = \epsilon_1 C_0$);

$T_{пов}$ и $T_о$ — соответственно абсолютная температура поверхности тела и окружающей среды, К;

F — излучающая поверхность тел, м².

Отсюда коэффициент лучеиспускания испытываемого твердого тела

$$C_2 = C_1 - \frac{Q_1 - Q_2}{\left[\left(\frac{T_{пов}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_в}{100} \right)^4 \right] \cdot F}. \quad (9)$$

Описание лабораторной установки

На рис. 7 изображена схема лабораторного стенда (см. схема лабораторной работы № 6). Два диска одинакового диаметра $D = 0,5$ м снабжены электрическими нагревателями. Диск 1 — тело с известной степенью черноты ϵ_1 . В данной опытной установке он выполнен из окисленной травленной стали. Диск 2 — испытываемое тело.

Электрическая мощность нагревателей изменяется с помощью регуляторов напряжения $P_{н1}$ и $P_{н2}$ и измеряется ваттметрами W_1 и W_2 .

Температура излучающей поверхности дисков t_1 и t_2 определяется с помощью хромель-копелевых термоэлектрических термометров, которые размещены в специальных каналах, просверленных в каждом диске до его центра и измеряется одноканальными микропроцессорными измерителями температуры T_1 и T_2 .

Порядок проведения работы и обработки результатов

Включить ток и с помощью регуляторов $P_{н1}$ и $P_{н2}$, установить такую произвольную по значению мощность электрических

нагревателей каждого диска, при которой температура их поверхностей $t_{\text{пов}}$ была бы одинаковой. О наступлении установившегося режима судят по неизменности температур дисков.

Измерить температуру дисков и температуру окружающего диска воздуха, а также электрическую мощность нагревателей каждого диска.

Коэффициент лучеиспускания испытуемого твердого серого тела определяется по формуле (9). Для определения коэффициента лучеиспускания известного твердого тела C_1 , Вт/м²·К⁴) необходимо по справочным таблицам найти значение степени черноты окисленной стали ϵ_1 ($\epsilon_1 \approx 0,93+0,97$ — для окисленной шероховатой стали). Полное количество теплоты, отдаваемое телами, равно значению электрической мощности нагревателя каждого диска $Q_1 = W_1$; $Q_2 = W_2$.

Найдя значение коэффициента лучеиспускания испытуемого твердого серого тела, по формуле (6) определяют степень его черноты ϵ_2 .

Опытные данные и результаты их обработки сводят в табл. 7.

Таблица 7

$t_{\text{пов}}, ^\circ\text{C}$	$t_0, ^\circ\text{C}$	$W_1, \text{Вт}$	$W_2, \text{Вт}$	$Q_1, \text{Вт}$	$Q_2, \text{Вт}$	$T, \text{К}$	$T_0, \text{К}$	$F, \text{м}^2$	ϵ_1	$C_1, \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$	$C_2, \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$	ϵ_2

ВНИМАНИЕ!

Для подключения лабораторного стенда к электрической сети — установить тумблер «сеть» в положение «вкл».

Для необходимой лабораторной работы — тумблер « T_m » установить в положение «лаб. работа № 1» или «лаб. работа № «2».

После окончания работы — не забудьте установить тумблер «сеть» в положение «откл».

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ ВОЗДУХА

Теоретические основы работы

Естественной конвекцией называется перемещение частиц жидкости или газа, обусловленное разностью их плотностей. Наиболее распространенным является свободное движение жидкости в гравитационном поле, вызываемое различием плотности ее отдельных слоев около поверхности под влиянием разности температур между поверхностью и окружающей средой. При естественной конвекции нагретые объемы теплоносителя поднимаются, охладившиеся — опускаются.

Величина, характеризующая интенсивность теплообмена между средой и поверхностью и численно равная количеству тепла, передаваемого единицей площади теплообменной поверхности к омывающей ее жидкости и обратно в единицу времени при разности температур между ними в один градус, называется *коэффициентом теплоотдачи*. От него зависят потери тепла или тепловосприятие поверхностей, имеющих температуру, отличную от температуры окружающей среды, а также размеры поверхностей нагрева (охлаждения) теплообменных аппаратов. Поэтому изучение факторов, влияющих на значение коэффициента теплоотдачи, имеет большое практическое значение.

Количество тепла, которое отдает боковая поверхности цилиндра (трубы) конвекцией в единицу времени, определяется по формуле:

$$Q_k = \alpha_k (t_{ст} - t_{воз}) \pi d l, \quad (10)$$

где α_k — коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м²·К);

$t_{ст}$ — средняя температура поверхности стенки, °С;

$t_{воз}$ — температура окружающего воздуха, °С;

d — наружный диаметр трубы, м;

l — длина трубы, м.

Уравнение (10) показывает, что искомое значение коэффициента теплоотдачи может быть определено, если известны

геометрические размеры поверхности d , l и ее температура $t_{\text{ст}}$, температура окружающей среды $t_{\text{воз}}$ и количество тепла, отдаваемое поверхностью в единицу времени конвекцией Q_k .

Помимо теплоотдачи конвекцией всякое нагретое тело отдает тепло лучеиспусканием:

$$Q_{\pi} = C_{\text{пр}} \left[\left(\frac{T_{\text{пов}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] \pi d l, \quad (11)$$

где $T_{\text{ст}}$ — температура стенки, К;

d — наружный диаметр трубы, м;

$T_{\text{воз}}$ — температура среды, К;

l — длина трубы, м;

$C_{\text{пр}}$ — приведенный коэффициент лучеиспускания системы, Вт/(м²·К⁴).

В данном случае излучает цилиндр, поверхность которого значительно меньше поверхности окружающих тел, и $C_{\text{пр}}$ можно рассчитать по формуле:

$$C_{\text{пр}} = C_0 \cdot \varepsilon, \quad (12)$$

где ε — степень черноты цилиндра (трубы);

C_0 — постоянная Стефана — Больцмана

$$C_0 = 5,75 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}. \quad (13)$$

Полное количество тепла, отдаваемое цилиндром:

$$Q_{\pi} = Q_k + Q_{\pi},$$

откуда:

$$Q_k = Q_{\pi} - Q_{\pi}.$$

Полное количество тепла Q_{π} в лабораторной работе определяется по электрической мощности. Потерями тепла с теплоизолированных концов трубы при большом отношении l/d можно пренебречь.

Конечным результатом работы является определение значения коэффициента теплоотдачи α , а также постоянных «С» и

« n » в критериальной зависимости, описывающей процесс конвекции, в виде:

$$Nu = C(GrPr)^n.$$

Описание лабораторной установки

Опытная установка (рис. 8) представляет собой стальную трубку с электрическим нагревателем внутри. С торцов нагреватель изолирован. Температура стенки трубы измеряется шестью хромель-копелевыми термопарами, смонтированными внутри трубки по ее длине и азимутальному углу и выходящими

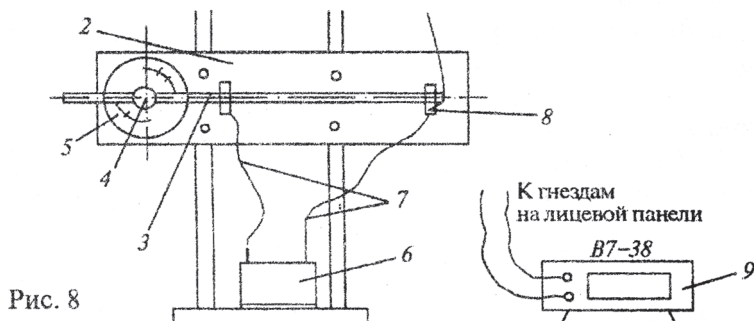


Рис. 8

ми с ее обеих сторон. Величина термо-ЭДС измеряется милливольтметром В7-38. Схема размещения термопар на рабочем участке представлена на рис. 9.

Длина трубки $L = 470$ мм.

Внешний диаметр $d = 12,5$ мм.

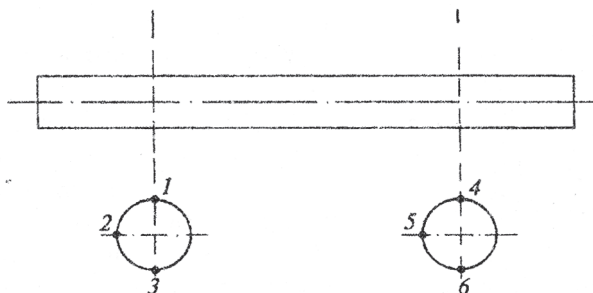


Рис. 9. Схема размещения термопар на рабочем участке установки

Порядок включения установки и проведение измерений

На рис. 10 представлена лицевая панель установки:

1. Перед включением убедитесь в надежности заземления корпуса установки и вольтметра.

2. Убедитесь, что тумблеры $T1$ и $T2$ установлены в положении ВЫКЛ, а регулятор P повернут в крайнее левое положение.

После этого необходимо произвести следующие действия.

1. Подключить вольтметр к одной из розеток стойки, расположенных на ее задней панели. Измерительные провода вольтметра подключены к гнездам (5), расположенных на лицевой панели стойки.

2. Включить шнур питания стойки к сетевой розетке. Установить тумблер «сеть» ($T1$) в положение ВКЛ. При этом загорается сигнальная лампа, и высвечиваются цифры на индикаторной панели вольтметра.

3. Установить тумблер $T3$ в положение UI и нажать кнопку $U_{\text{н}}$ на панели вольтметра. Тумблер $T4$ установить в положение U .

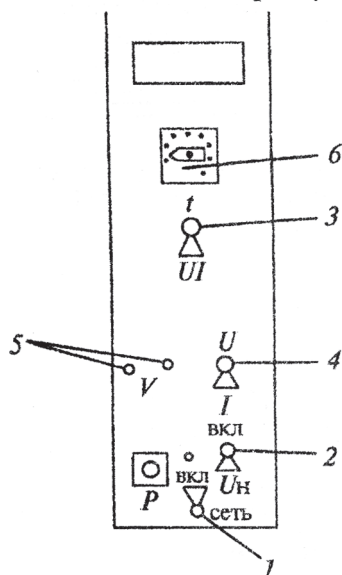


Рис. 10. Обработка опытных данных

4. Включить тумблер $T2$. Повернув ручку регулятора P по часовой стрелке, выставить напряжение на трубке $\approx 0,5$ В.

5. Установить тумблер $T3$ в положение t и, нажав кнопку $U_{\text{н}}$ на панели вольтметра, произвести измерение термо-ЭДС всех термопар (6 штук). При этом необходимо дождаться выхода на стационарный режим (примерно 10–15 минут).

6. Вновь установить тумблер $T3$ в положение UI и нажать кнопку $U_{\text{н}}$ на панели вольтметра. Переключая тумблер $T4$ в положение U , произвести измерение напряжения на трубке, а в положении I — силы тока по трубке.

7. Пункты 5–6 повторить для других значений напряжений на трубке, изменяя его с помощью регулятора P . Не перегревать трубку выше 160°C , что соответствует значению термо-ЭДС 11,39 мВ.

8. После проведения измерений ручку регулятора P повернуть в крайнее левое положение до щелчка.

9. Выключить тумблеры $T2$ и $T1$. Отключить стойку от сети. Результаты измерений занести в табл. 8.

Таблица 8

Время замера	№ опыта	U , В	I , А	Q_n , Вт	$t_{\text{ст}1}$, $^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{ст}2}$, $^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{ст}3}$, $^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{ст}4}$, $^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{ст}5}$, $^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{ст}6}$, $^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{ст}n}$, $^{\circ}\text{C}$

Обработка опытных данных

1. Определить в каждом опыте полное количество тепла, отдаваемое трубой в окружающую среду, в с:

$$Q_n = IU(B_T);$$

где I — сила тока, А;

U — напряжение, В.

2. Найти среднюю температуру поверхности трубы

$$t_{\text{ст}} = \frac{t_{\text{ст}1} + t_{\text{ст}2} + t_{\text{ст}3} + t_{\text{ст}4} + t_{\text{ст}5} + t_{\text{ст}6}}{6}.$$

3. Рассчитать количество теплоты, Вт, отдаваемое трубой в окружающую среду лучеиспусканием:

$$Q_{\text{л}} = \varepsilon C_0 \left[\left(\frac{T_{\text{ст}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{воз}}}{100} \right)^4 \right] \pi dl,$$

где $\varepsilon = 0,15$ — нержавеющая сталь.

4. Найти количество тепла, отдаваемое трубой конвекцией

$$Q_{\text{к}} = Q_{\text{п}} - Q_{\text{л}}.$$

5. Рассчитать величину коэффициента теплоотдачи конвекцией

$$\alpha_k = \frac{Q_k}{\pi d l (t_{\text{ст}} - t_{\text{воз}})}, \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}}.$$

6. Средняя (определяющая) температура воздуха

$$t_m = \frac{1}{2}(\overline{t_{\text{ст}}} + t_{\text{воз}}).$$

7. Коэффициент объемного расширения воздуха:

$$\beta = \frac{1}{273 + t_m} \cdot ^\circ\text{С}^{-1}.$$

8. Найти величину критерия теплообмена Нуссельта:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha_k d}{\lambda_{\text{т}}},$$

где $\lambda_{\text{т}}$ — коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·град).

9. Рассчитать критерий подъемной силы Грасгофа:

$$\text{Gr}_m = \frac{g \beta \Delta t d^3}{\nu_m^2},$$

где Δt — температурный напор $\Delta t = \overline{t_{\text{ст}}} - t_{\text{воз}}$;

ν_m — коэффициент кинематической вязкости воздуха.

10. Критерий физических свойств воздуха (Прандтля)

$$\text{Pr}_m = \frac{\nu_m}{\alpha_m} = \frac{\nu_m c_{p_m} \rho_m}{\lambda_m}.$$

Величины λ_m , ν_m , ρ_m находятся по справочным данным.

Опытные данные, полученные при различных режимах работы установки, и результаты их обработки сводятся в табл. 9.

10. Построить график (рис. 11) зависимости критерия Nu_m от комплекса $(\text{GrPr})_m$ в логарифмических координатах, провести прямую линию, наиболее близко проходящую к опытным точкам.

Таблица 9

Q_k	$t_{ст}$	Q_n	Q_d	α	t_m	β	λ_m	v_m	Nu_m	Gr_m	Pr_m	$lgNu_m$	$(GrPr)$	$lg(GrPr)$

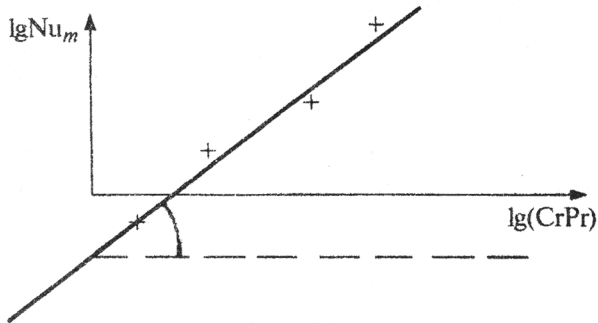


Рис. 11

12. Находится зависимость между критериями подобия в виде:

$$Nu_m = C(GrPr)^n.$$

Логарифмируя, получаем: $lgNu_m = lgC + nlg(GrPr)_m$.

13. Величины C и n определяем по графику (рис. 11) — зависимости критерия Nu_m от комплекса $(GrPr)_m$.

ВОПРОСЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ К РАБОТЕ

1. Дайте определение подобия двух физических процессов.
2. Сформулируйте признаки, по которым можно судить, что явления подобны.
3. Запишите критериальное уравнение для процесса теплоотдачи естественной конвекции от трубы.
4. Как выражается критерий Грасгофа через физические параметры?
5. Что принимается за определяющую температуру в критериальном уравнении?

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Александров А.А. Термодинамика. Основы циклов теплоэнергетических установок, 2004.
2. Кудин В.А., Карташов Д.М. Техническая термодинамика: Уч. пос. 2-е изд. — М.: Высшая школа, 2001.
3. Луканин В.А., Шатров М.Т. Теплотехника: — М.: Высшая школа, 2000.
4. Теплотехника / Под ред. А. Архарова, В. Афанасьева. 2-е изд. — М.: 2005.
5. Термодинамика. Основы циклов теплоэнергетических установок: Уч. пос. 2005.

Приложение

Градуировочная характеристика хромель — копелевой термпары
в диапазоне температур — 50÷800°C (по СТ СЭВ 1059-78)

Температура рабочего конца, °C	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-50	-3,110									
-40	-2,500	-2,561	-2,622	-2,683	-2,744	-2,805	-2,866	-2,927	-2,988	-3,049
-30	-1,890	-1,951	-2,012	-2,073	-2,134	-2,195	-2,256	-2,317	-2,378	-2,439
-20	-1,270	-1,336	-1,394	-1,456	-1,518	-1,580	-1,642	-1,704	-1,766	-1,828
-10	-0,640	-0,703	-0,766	-0,829	-0,892	-0,955	-1,018	-1,081	-1,144	-1,207
-0	-0,000	-0,064	-0,128	-0,192	-0,256	-0,320	-0,384	-0,448	-0,512	-0,576
+0	0,000	0,064	0,128	0,192	0,256	0,321	0,386	0,451	0,516	0,581
10	0,646	0,711	0,776	0,841	0,907	0,973	1,039	1,105	1,171	1,237
20	1,303	1,370	1,437	1,504	1,571	1,638	1,705	1,772	1,840	1,908
30	1,976	2,044	2,112	2,180	2,248	2,316	2,384	2,452	2,520	2,589
40	2,658	2,727	2,796	2,865	2,934	3,003	3,072	3,141	3,210	3,280
50	3,350	3,420	3,490	3,560	3,630	3,700	3,770	3,840	3,910	3,980
60	4,050	4,121	4,192	4,263	4,334	4,405	4,476	4,547	4,618	4,689
70	4,760	4,831	4,902	4,973	5,044	5,115	5,186	5,257	5,327	5,398
80	5,469	5,540	5,611	5,682	5,753	5,824	5,895	5,966	6,037	6,108
90	6,179	6,250	6,322	6,394	6,466	6,538	6,610	6,682	6,754	6,826
100	6,898	6,970	7,043	7,116	7,189	7,262	7,335	7,408	7,481	7,554
110	7,627	7,700	7,774	7,848	7,922	7,996	8,070	8,144	8,218	8,292
120	8,366	8,440	8,515	8,590	8,665	8,740	8,815	8,890	8,965	9,040
130	9,115	9,190	9,265	9,340	9,415	9,490	9,565	9,640	9,715	9,790
140	9,8651	9,940	10,016	10,092	10,168	10,224	10,320	10,396	10,472	10,548
150	0,624	10,700	10,777	10,854	10,931	11,008	11,085	11,162	11,239	11,316
160	11,393	11,470	11,548	11,626	11,704	11,782	11,860	11,938	12,016	12,094
170	12,172	12,250	12,329	12,408	12,487	12,566	12,645	12,724	12,803	12,882
180	12,961	13,040	13,120	13,200	13,280	13,360	13,440	13,520	13,600	13,680
190	13,760	13,841	13,922	14,003	14,084	14,165	14,246	14,327	14,408	14,489
200	14,570	14,651	14,732	14,813	14,894	14,975	15,056	15,137	15,218	15,299
210	15,380	15,462	15,544	15,626	15,708	15,790	15,872	15,954	16,036	16,118
220	16,200	16,283	16,366	16,449	16,532	16,615	16,698	16,781	16,864	16,947
230	17,030	17,113	17,196	17,279	17,362	17,445	17,528	17,611	17,694	17,777

Окончание прил.

Температура рабочего конца, °C	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
240	17,860	17,943	18,026	18,109	18,192	18,275	18,358	18,441	18,524	18,607
250	17,690	18,773	18,856	18,939	19,022	19,105	19,188	19,271	19,354	19,437
260	19,520	19,604	19,688	19,772	19,856	19,940	20,024	20,108	20,192	20,276
270	20,360	20,444	20,528	20,612	20,696	20,780	20,864	20,948	21,032	21,116
280	21,200	21,284	21,368	21,452	21,536	21,620	21,704	21,788	21,872	21,956
290	22,040	22,124	22,208	22,292	22,376	22,460	22,544	22,628	22,712	22,796
300	22,880	22,964	3,048	23,132	23,216	23,300	23,384	23,468	23,552	23,636
310	23,720	23,804	23,888	23,972	24,056	24,140	24,224	24,308	24,392	24,476
320	24,560	24,645	24,730	24,815	24,900	24,985	25,070	25,155	25,240	25,325
330	25,410	25,496	25,582	25,668	25,754	25,840	25,926	26,012	26,098	26,184
340	26,270	26,356	26,442	26,528	26,614	26,700	26,786	26,872	26,958	27,044
350	27,130	27,217	27,304	27,391	27,478	27,565	27,652	27,739	27,826	27,913
360	28,000	28,087	28,174	28,261	28,348	28,435	28,522	28,609	28,696	28,78

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Лабораторная работа № 1	
Изучение i - s -диаграммы водяного пара	4
Лабораторная работа № 2	
Определение характеристик состояния влажного воздуха с помощью психрометра	8
Лабораторная работа № 3	
Определение среднего значения показателя политропного процесса сжатия индикаторной диаграммы поршневого компрессора	12
Лабораторная работа № 4	
Исследование цикла холодильной парокомпрессионной установки»	16
Лабораторная работа № 5	
Определение коэффициента теплопроводности изоляционного материала методом трубы	20
Лабораторная работа № 6	
Определение коэффициента лучеиспускания твердого серого тела и степени его черноты.....	25
Лабораторная работа № 7	
Определение коэффициента теплоотдачи при свободной конвекции воздуха	29
Рекомендуемая литература	36
Приложение	37

i-s-диаграмма для водяного пара

(масштаб энтальпии 1 мм = 5 кДж/кг; энтропии 1 мм = 0,01 кДж/(кг·К))

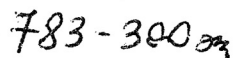


Рис. 1

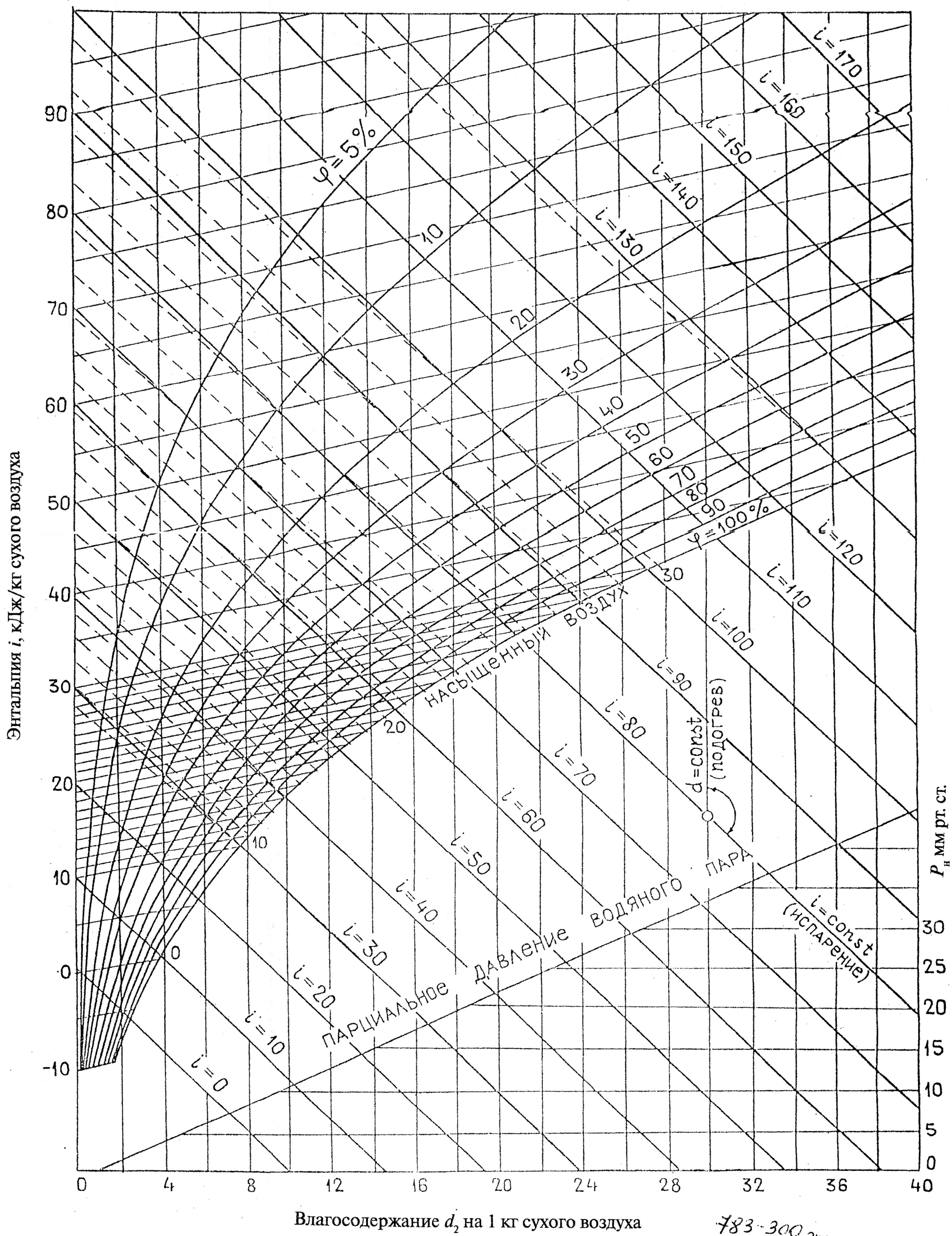
i-d-диаграмма для влажного воздуха при $P = 745$ мм рт. ст.

Рис.2