

2963



Министерство образования
Республики Беларусь

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Теплогазоснабжение и вентиляция»

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

Лабораторный практикум

Минск 2006

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Теплогазоснабжение и вентиляция»

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

Лабораторный практикум
для студентов специальности
1-70 04 02 «Теплогазоснабжение, вентиляция
и охрана воздушного бассейна»

Минск 2006

УДК 621.1.016.7 (076.5)

~~ББК 31.31я7~~

Т 38

Составители:

*И.И. Станецкая, Е.С. Калиниченко,
В.Д. Акельев, Л.В. Нестеров*

Рецензенты:

Р.И. Есьман, А.М. Протасевич

Т 38 Техническая термодинамика: лабораторный практикум для студентов специальности 1-70 04 02 «Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна»/Сост.: И.И. Станецкая, Е.С. Калиниченко, В.Д. Акельев, Л.В. Нестеров. – Мн.: БНТУ, 2006. – 91 с.

В практикуме приведены основные теоретические сведения по темам лабораторных работ; дано описание лабораторных установок, методик и порядка выполнения работ; приведены краткие сведения из области теплотехнических измерений физических величин и оценки погрешностей эксперимента

ISBN 985-479-502-0

© БНТУ, 2006

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Прежде чем приступить к выполнению лабораторных работ, студенту необходимо изучить основные правила их выполнения, получить инструктаж по технике безопасности и расписаться в журнале инструктажа.

Студент должен знать и выполнять правила пожарной безопасности.

Студент допускается к выполнению лабораторной работы только после изучения соответствующих методических указаний, ознакомления с литературой по курсу, заготовки бланка отчета и собеседования с преподавателем.

Отчет по выполненной лабораторной работе должен включать следующие разделы: цель работы, краткое описание основных понятий и применяемых формул, схему экспериментальной установки и её краткое описание, обработку результатов измерений, анализ полученных результатов и выводы; рисунки и таблицы должны выполняться технически грамотно и аккуратно.

ОСНОВНЫЕ ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

Запрещается:

включать и выключать лабораторные установки без разрешения преподавателя;

вносить изменения в схему установки и переставлять приборы, агрегаты и другое оборудование;

прикасаться к токоведущим частям, которые находятся или могут находиться под напряжением;

производить переприсоединение электрических проводов на лабораторных установках;

касаться нагретых поверхностей, движущихся частей оборудования.

При обнаружении неисправностей или повреждения лабораторного оборудования студент должен немедленно сообщить об этом преподавателю.

Во избежание ожогов паром, горячей водой при выполнении лабораторных работ необходимо внимательно следить за давлением

пара в котле. Необходимо помнить, что давление пара по манометру не должно превышать 0,12 МПа (1,2 кгс/см²). Уровень воды в котле должен быть не менее половины его высоты.

В случае пожара следует немедленно принять меры по ликвидации загорания.

В случае необходимости следует вызвать пожарную команду по телефону 01, скорую помощь – по телефону 03.

ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Измерение температуры

Согласно молекулярно-кинетической теории температурой называется условная статическая величина, прямо пропорциональная средней кинетической энергии молекул. Она не поддается непосредственному измерению. О значении температуры судят по изменению некоторых физических свойств при изменении величины средней кинетической энергии поступательного движения молекул вещества, например, по изменяющемуся объему или давлению жидкости или газа, по величине электродвижущей силы, возникающей на спае двух разнородных металлов и т.д.

Существует огромное множество различных устройств для измерения температуры: жидкостные и манометрические термометры, электрические термометры сопротивления, термопары (термоэлектрические термометры) в комплекте с потенциометром, оптические термометры и др.

Жидкостные стеклянные термометры

Действие жидкостных термометров основано на различии коэффициентов теплового расширения термометрического вещества и оболочки, в которой оно находится (термометрического стекла или кварца). Такой термометр состоит из стеклянного баллона 1, капиллярной трубки 3, запасного резервуара 4 и термометрического вещества 2 (рис. 1 а).

Баллон и частично капиллярная трубка заполняются термометрическим веществом, а свободное пространство в капиллярной трубке и запасном резервуаре заполняется инертным газом или находится под вакуумом (при измерении температур ниже 373 К).

В качестве термометрического вещества чаще всего применяют химически чистую ртуть. Она не смачивает стекло и остается жидкой в широком интервале температур (от 238 до 875 К). Кроме ртути используются этиловый и метиловый спирты, керосин, эфир, пентан, толуол, гелий и другие жидкости.

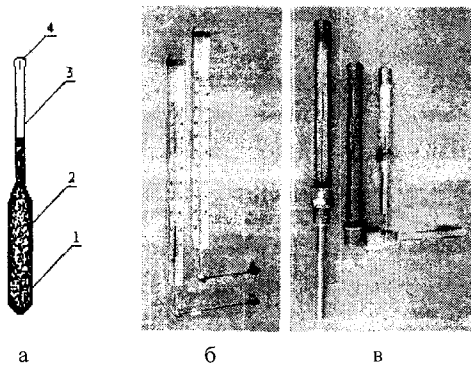


Рис. 1. Жидкостный термометр

Стеклянные жидкостные термометры (рис. 1б и 1в) имеют весьма широкое применение в быту и технике с допустимой погрешностью измерения не более одного деления шкалы. Допустимая погрешность показаний у образцовых термометров со шкалой от 273 до 333 К при цене деления 0,01 К не должна превышать $\pm 0,05$ К.

Проверка показаний жидкостных термометров производится в термостатах путем сличения с образцовыми приборами более высокого класса.

Манометрические термометры

Действие манометрических термометров основано на изменении давления жидкости или газа при постоянном объеме за счет изменения температуры. Измерительная схема манометрического термометра состоит из чувствительного элемента 1, воспринимающего температуру измеряемой среды, соединительного гибкого капилляра 2, манометра 3, измеряющего давление термометрического вещества, и термобаллона (рис. 2).

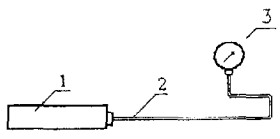


Рис. 2. Схема манометрического термометра

При изменении температуры исследуемой среды давление в термобаллоне тоже изменяется и по капилляру передается на манометр, стрелка которого перемещается по шкале, отградуированной в градусах температуры.

Биметаллические термометры

Действие биметаллического термометра основано на свойстве теплового расширения твердых тел. В термометрах такого типа в качестве чувствительного элемента используются пластинки из двух слоев разнородных металлов или сплавов, обладающих различными коэффициентами теплового расширения. Чаще всего применяют биметаллические пластинки, состоящие из латуни (70 % *Cu* и 30 % *Zn*) и инвара (64 % *Fe* и 36 % *Ni*).

При нагреве биметаллическая пластинка деформируется. По величине деформации судят о величине температуры.

Термопары

Термоэлектрический метод измерения температуры основан на эффекте Зеебека (1821), сущность которого состоит в следующем. Если спаи двух разнородных проводников в электрической цепи (термоэлектродов) поместить в среду с неоднородным температурным полем (рис. 3), то в цепи возникает разность электрических потенциалов ΔE (термоэлектродвижущая сила), пропорциональная разности температур $T_1 - T_2$. Измерив величину термо-э.д.с и зная температуру свободного спаи термопары, можно определить температуру измеряемой среды

$$\Delta E = \alpha \cdot (T_1 - T_2), \quad (1)$$

где α - коэффициент пропорциональности.

В качестве термоэлектродов может быть использовано множество различных металлов и сплавов из них. Обычно выбирают два материала, которые образуют термопару определенных термоэлектрических свойств. Соединенные между собой концы термоэлектродов, погружаемых в измеряемую среду, называют рабочим спаем.

Концы, находящиеся в окружающей среде (атмосфере, льде), к которым обычно присоединяют провода от измерительных приборов, называют свободным (холодным) спаем.

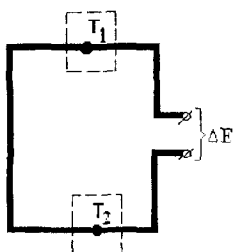


Рис. 3 Схема цепи из двух разнородных проводников

Наибольшее распространение получили термопары, приведенные в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Некоторые характеристики термопар

Наименование термопар	Условное обозначение градуировки	Верхний предел длительного применения термопары, К
Платино-платинородисвая	П	1573
Хромель-алюмелевая	ХА	1273
Хромель-копелевая	ХК	873

Иногда для измерения температуры применяют нестандартные термопары: медь-константановые, железо-константановые и другие, которые при низких температурах имеют большую величину термо-э.д.с. При использовании этих термопар следует иметь в виду, что величина возникающей термо-э.д.с. сильно зависит от однородности материала термоэлектродов. Выпускаемые промышленностью медные, константановые и железные провода могут иметь различный химический состав и однородность по длине. Поэтому при пользовании указанными термопарами перед началом измерений (после изготовления) их необходимо тарировать.

Проверка термопар производится с целью определения соответствия градуировочной характеристики проверяемой термопары стандартной. При проверке технических термопар из благородных металлов в интервале температур 573...1373 К должны применяться образцовые платино - платинородиевые термопары, а при $T < 573$ К - стеклянные ртутные термометры.

В качестве вторичного прибора для измерения величины термо - э.д.с. используются магнитоэлектрические милливольтметры и различного типа потенциометры.

Пирометры излучения

Технические визуальные оптические пирометры предназначены для измерения яркостной температуры от 1173 до 2973, 3473, 4773 К и выше. Наиболее совершенным оптическим пирометром является "монохроматический оптический пирометр с исчезающей нитью накала".

Радиационные пирометры используются для измерения радиационной температуры от 327 до 3273 К. Чувствительным элементом в них является батарея термопар, с помощью которой энергия, излучаемая поверхностью нагретого тела, преобразуется в электродвижущую силу. По величине этой э.д.с. судят о температуре тела.

Радиационный пирометр состоит из телескопа и измерительного прибора. В комплекте с телескопом могут использоваться электронный потенциометр или милливольтметр.

Измерение давления

Единицей давления в системе СИ является Паскаль по имени французского ученого Б. Паскаля (1623-1662). 1 Паскаль – давление, вызываемое силой 1 Н, равномерно распределенной по поверхности площадью 1 м². Соотношения 1 Паскаля с другими единицами измерения давления приведены в Приложении 4.

Все приборы для измерения давления условно можно классифицировать по следующим признакам:

- 1) роду измеряемой величины;
- 2) принципу действия;
- 3) классу точности.

По роду измеряемой величины приборы подразделяются на:

- а) манометры – приборы для измерения положительного избыточного давления (p_m);
- б) вакуумметры – приборы для измерения отрицательного избыточного давления (p_v);
- в) мановакуумметры – приборы, позволяющие измерять, как положительное избыточное давление, так и отрицательное p_m (p_v);
- г) дифференциальные манометры – приборы для измерения разности давлений в двух точках (Δp);
- д) барометры – приборы для измерения атмосферного давления (p_0).

По принципу действия приборы для измерения давления подразделяются на следующие виды:

а) жидкостные, основанные на гидростатическом принципе действия, то есть измеряемое давление уравнивается давлением столба жидкости, высота которого определяется непосредственно или путем расчета. Впервые идея измерения давления по величине столба жидкости была высказана итальянским ученым Торричелли в 1640 г., а осуществлена итальянским механиком Вивiani в 1642 г и французским ученым Паскалем в 1646 г. Жидкостные приборы не утратили своего значения до настоящего времени. Это объясняется тем, что принцип действия этих приборов очень прост, они точны, надежны и просты в изготовлении;

б) механические, принцип действия которых заключается в том, что под воздействием давления происходит деформация некоторого упругого элемента. Величина этой деформации служит мерой измеряемого давления. Механические приборы в свою очередь подразделяют на технические и образцовые. Образцовые используют для целей поверки, так как они сверяются с эталонными приборами. Технические используют непосредственно для измерения давления;

в) грузопоршневые манометры, в которых измеряемое давление, действуя на одну сторону поршня, уравнивается внешней силой, приложенной с противоположной стороны поршня. В качестве уравнивающей силы используют грузы. Масса груза, отнесенная к площади поршня, определяет величину измеряемого давления;

г) электрические, принцип действия которых основан на изменении электрических свойств некоторых материалов или каких-либо электрических параметров под воздействием давления;

д) комбинированные манометры, принцип действия которых носит смешанный характер.

По классу точности все выпускаемые серийно приборы делятся на классы. Классом точности прибора называется основная наибольшая допустимая приведенная погрешность. Установленные классы точности для приборов давления соответствуют следующему ряду: 0,005; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.

Жидкостные манометры

В жидкостных манометрах давление измеряется по величине столба жидкости, уравнивающего это давление.

В качестве манометрических жидкостей используются ртуть, дистиллированная вода, спирт, керосин, толуол. Преимуществом ртути перед другими жидкостями является то, что она при комнатной температуре имеет небольшое давление пара и обладает малой способностью растворять газы. Однако большое поверхностное натяжение ртути приводит к тому, что ее мениск, даже в достаточно широких трубках, склонен к заметному капиллярному понижению, которое в общем может быть учтено с точностью примерно 10%. На ртутный мениск оказывает заметное влияние при длительном воздействии кислород. Поэтому при точных измерениях иногда используют приспособление (острие Бунзена), которое способствует тому, что при подъеме уровня ртути поверхность ее становится чистой. Поскольку плотность ртути и длина шкалы изменяются с температурой, необходимо обращать внимание на температуру манометра, чтобы можно было по таблицам пересчитать давление на температуру 0° .

Простейшим прибором для измерения небольших давлений является U-образный жидкостный манометр, схема которого представлена на рис. 4.

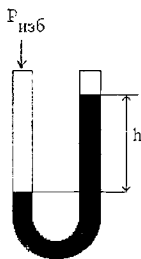


Рис. 4. U-образный жидкостный манометр

Избыточное давление определяется по формуле

$$p_{\text{изб}} = h \cdot \rho \cdot g, \quad (2)$$

где h – высота столба жидкости, м;

ρ – плотность манометрической жидкости, кг/м^3 ;

g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

Модификацией U-образного манометра является чашечный манометр (рис. 5).

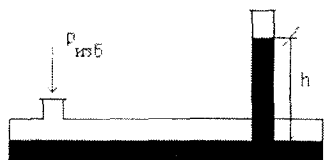


Рис. 5. Чашечный жидкостный манометр

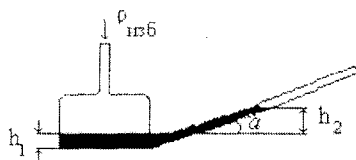


Рис. 6. Дифференциальный манометр с наклонной трубкой

При измерении малых давлений жидкостей и газов можно использовать дифференциальные манометры с наклонной U – образной трубкой и резервуаром (микроманометр). Они бывают с постоянным и переменным углом наклона измерительной трубки (рис.6). В этом случае избыточное давление определяется по формуле

$$p_{\text{изб}} = (h_2 - h_1) \cdot \rho \cdot \sin \alpha, \quad (3)$$

где h_1 – высота уровня жидкости в резервуаре, м;

h_2 – высота уровня в измерительной трубке, считываемая по шкале, м;

ρ – плотность жидкости, кг/м^3 ;

α – угол наклона трубки, град.

Вследствие большой разности объемов резервуаров и трубки изменение h_1 настолько незначительно, что его не учитывают. Обычно микроманометры заполняются спиртом. Микроманометры с постоянным углом наклона измерительной трубки называются тягонапорометрами.

Большой точности отсчетов можно добиться применением U – образных манометров с двумя жидкостями (рис. 7).

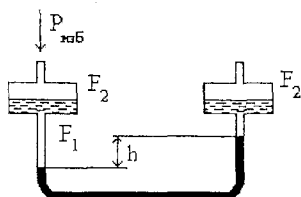


Рис. 7. U – образный манометр с двумя жидкостями

Избыточное давление находится по формуле

$$P_{изб} = (h - h_0) \cdot \left(\rho_2 - \rho_1 + \frac{F_1}{F_2} \rho_1 \right) \cdot g, \quad (4)$$

где F_1 – площадь поперечного сечения колена, образующего U – образную трубку, m^2 ;

F_2 – площадь поперечного сечения резервуаров, m^2 ;

ρ_1 – плотность более легкой жидкости, $кг/м^3$;

ρ_2 – плотность более тяжелой жидкости, $кг/м^3$;

h – показание манометра, м;

h_0 – показание манометра при нулевой разности давлений, м.

Обычные жидкостные манометры могут быть использованы как эталоны для тарировки других манометров.

Механические манометры

Механические приборы получили наибольшее распространение, так как они характеризуются следующими преимуществами: простота устройства и использования, портативность, универсальность, практически неограниченный диапазон измерения, начиная от нескольких кПа и до сотен МПа.

В механических манометрах давление измеряется по величине деформации упругой детали, вызываемой им. Они делятся на трубчатые, мембранные и пружинные.

В трубчатом манометре указательная стрелка движется за счет деформации трубчатой пружины при изменении давления жидкости

внутри нее. Точность этих манометров ограничена наличием остаточных деформаций трубки, появляющихся в процессе работы.

Чувствительным элементом мембранных манометров служат плоские или гофрированные мембраны, связанные с указательной стрелкой. Повышение чувствительности мембранных манометров достигается заменой простых мембран anerоидными коробками или применением гармоникообразных мембран - сильфонов.

На рис. 8 показан манометр с гофрированной мембраной. На нижнем фланце манометра имеется ниппель 1 для подключения к сосуду, в котором измеряется давление. Верхний фланец составляет одно целое с корпусом манометра. Между фланцами находится гофрированная мембрана 2. Фланцы плотно стянуты болтами. В центре мембраны закреплена стойка, шарнирно соединенная с зубчатым сектором передаточного механизма. По величине деформации мембраны судят о давлении. Мембраны для измерения различных давлений отличаются толщиной, диаметром, видом материала и т. д. Пределы измеряемых давлений для мембранных манометров ограничены и составляют от 20 кПа до 30 МПа. Мембранные манометры используют при измерении давлений в высоковязких средах, так как прямой и широкий канал в ниппеле обеспечивает более свободный проход жидкости, чем в трубчатом манометре. Для измерений в химически агрессивных средах нижнюю сторону мембраны покрывают тонкой пленкой защитного материала.

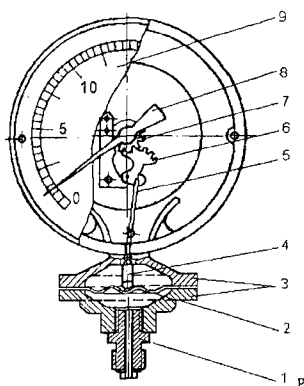


Рис. 8. Манометр с гофрированной мембраной:
1 – ниппель; 2 – мембрана; 3 – фланцы; 4 – стержень; 5 – тяга;
6 – сектор; 7 – трибка; 8 – стрелка; 9 – шкала

Принцип действия мембранного манометра позволяет использовать его и для измерения разрежения. Если мембранный манометр присоединить к полости с разрежением, то мембрана, испытывая атмосферное давление снаружи, будет прогибаться во внутрь, что вызывает поворот стрелки в сторону, обратную по сравнению с манометром.

Сильфонные приборы для измерения давления являются еще одной разновидностью механических приборов. В качестве упругого элемента в них используется сильфон, который представляет собой гофрированную коробку, выполненную в виде цилиндра с равномерными складками (гофрами). Если такой сильфон подвергнуть воздействию избыточного давления снаружи или изнутри, то он сожмется или растянется по высоте так, что его горизонтальные поверхности будут перемещаться параллельно самим себе. Величина перемещения пропорциональна величине измеряемого давления. Сильфонные манометры применяются для измерения давлений от 40 кПа до 0,5 МПа. Изменение пределов измерения достигается за счет толщины мембраны, диаметра и размера гофр, а также жесткостью винтовой пружины, размещенной внутри полости сильфона.

Пружинные приборы появились на двести лет позднее жидкостных (1846-1848 гг.). Основной деталью пружинных манометров является полая трубка с поперечным сечением в виде овала или эллипса, которая по имени автора одного из первых манометров и называется трубкой Бурдона. Один конец трубки заканчивается ниппелем с резьбой для подключения к сосуду, в котором измеряется давление, а второй запаян. Свободный запаянный конец трубчатой пружины при помощи тяги шарнирно соединяется с зубчатым сектором, находящимся в зацеплении с маленькой шестеренкой (трибкой). На ось трибки насажена стрелка, которая указательным концом подходит к шкале, нанесенной на циферблате (рис. 9).

Если манометр присоединить к полости с избыточным давлением, то силы давления в трубке несколько распрямляют ее, свободный конец трубки при этом перемещается, тяга поворачивает зубчатый сектор и находящуюся с ним в зацеплении трибку. По положению стрелки на шкале судят о величине измеряемого давления.

Манометры с многовитковой трубчатой пружиной являются, как правило, регистрирующими манометрами. Чувствительным элементом в них является многовитковая пружина, которая представляет собой полую трубку овального сечения с 5-9 витками, расположенными по винтовой линии.

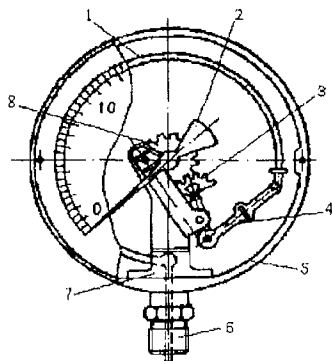


Рис.9 Манометр с одновитковой трубчатой пружиной:
 1 – трубчатая пружина; 2 – стрелка; 3 - зубчатый сектор; 4 – тяга;
 5 – корпус манометра; 6 – ниппель; 7 – основание манометра; 8 - трибка

Трубчатая пружина может быть использована и в вакуумметре. Если пружину соединить с пространством, в котором имеет место разрежение, то под действием внешнего атмосферного давления она деформируется. Причем свободный конец перемещается не вверх, как у манометра, а вниз. Соответственно и стрелка поворачивается в противоположную сторону. Шкала вакуумметра размечается в мм рт. ст. Предельное значение шкалы 760 мм рт. ст. наносится условно, (так как полный вакуум практически не достижим).

Если в одном и том же месте по условиям работы экспериментальной установки возможно и избыточное давление и вакуум, то используется комбинированный прибор, называемый мановакуумметром. Предельное значение шкалы манометрического давления может быть любым и зависит лишь от использованной в данном манометре трубки. Зная, на какое избыточное давление рассчитана трубка мановакуумметра, можно найти соотношение между длинами манометрической и вакуумметрической шкал. Так, если манометрическая шкала рассчитана на 1,0 МПа, вакуумметрическая шкала будет занимать 1/10 от шкалы давления, если на 2,0 МПа, то 1/20 и так далее. Чем больше избыточное давление, на которое рассчитан мановакуумметр, тем меньше размер вакуумметрической шкалы и ниже точность измерения вакуума.

Пружинные манометры применяют при температуре до 65 °С, так как выше этой температуры механические свойства металлической пружины частично изменяются. Для измерения давления при более высоких температурах трубку манометра заполняют жидкостью, предохраняющей её от воздействия высокой температуры.

Лучшие пружинные манометры имеют класс точности 0,2 или 0,35.

К механическим манометрам относятся и поршневые манометры, которые считаются образцовыми приборами для измерения высокого давления.

Определение массы вещества

Выбор метода измерения массы вещества обусловлен агрегатным состоянием вещества, особенностями постановки эксперимента, требованиями, предъявляемыми к точности получаемых результатов, и зависит от того, неподвижна, ограниченно подвижна субстанция или это непрерывно перемещающийся поток вещества. В связи с изложенным определение массы вещества проводится в основном следующими тремя методами:

1) масса неподвижного вещества в большом количестве — обменом объема и определением его плотности;

2) масса малоподвижного вещества — либо первым способом, либо периодическим взвешиванием, либо определением объема тарированным сосудом с попутным определением его плотности;

3) при измерении массы непрерывно перемещающихся потоков применяются, в зависимости от особенностей производства и агрегатного состояния вещества, различные весовые и емкостные измерители непрерывного действия для сыпучих, жидких и газообразных веществ. Для измерения массы последних могут быть применены расходомеры.

Наибольшее распространение при экспериментальных исследованиях получил метод измерения массы вещества, основанный на периодическом взвешивании или определении объема тарированными сосудами, а также различными определителями расхода массы движущихся потоков жидкостей и газов.

В настоящее время разработано большое количество различных приборов для определения массы вещества путем его взвешивания, которые можно подразделить на весы с коромыслом, пружинные, электротензометрические, с упругим магнитным датчиком, пневматические или гидравлические.

К первой группе относятся все весы с гирями и циферблатные, основанные на равновесии коромысла или установлении маятника под определенным углом в зависимости от эксцентрично приложенной нагрузки. Например, весы почтовые, торговые, медицинские и т.д.

Пружинные весы наименее точные; они используются для грубого взвешивания.

Электротензометрические весы основаны на принципе изменения электропроводимости веществ в зависимости от их деформации, которая определяется величиной массы вещества. Аналогично устроены весы с упругомагнитным датчиком: изменение магнитного поля изменяет индуктивное сопротивление чувствительного элемента.

Пневмо- и гидровесы устроены аналогично. В этом случае в зависимости от величины массы изменяется давление в системе, передаваемое поршнем или мембраной. Разновидностью гидровесов являются весы поплавковые, где величина массы вещества, уложенного или подвешенного к поплавку, определяет глубину погружения в жидкость.

По своему назначению весы делятся на лабораторные, платформенные общего назначения, платформенные специального назначения и автоматические для сыпучих материалов и жидкостей.

В исследовательской практике распространение получили лабораторные весы. По точности измерения все лабораторные весы делятся на классы и разряды:

- 1) весы технические и аналитические - на 1-й и 2-й классы;
- 2) весы образцовые - на I, II и III разряды.

Каждый весовой прибор снабжается характеристикой его максимальной нагрузки и наибольшей величиной погрешности при заданных нагрузках.

В лабораторных работах, изложенных в настоящем практикуме, измерение количества массы, участвующей в эксперименте, производится взвешиванием на технических весах 2-го класса. Порядок взвешивания следующий.

1. Определяется нахождение нулевой точки. Для этого при освобожденном от ориентира коромысле добиваются, чтобы отклонение стрелки от нулевого положения в обе стороны было одинаково,

2. Взвешиваемую массу помещают только на левую чашку весов в ориентированном состоянии, а на правую - разновес примерно той же массы, после чего осторожно освобождают коромысло.

3. Смена гирь и масс производится на весах только в ориентированном состоянии.

4. Подсчет гирь производится дважды, сначала по освободившимся в ящике для равновесия местам, а потом при переносе равновесия в ящик. Вторичную проверку измеренной массы можно производить только на тех же весах.

При пользовании весами запрещается:

- а) переносить или передвигать весы без разрешения и участия преподавателя или лаборанта;
- б) взвешивать массу, большую, чем максимальная грузоподъемность весов;
- в) взвешивать вещество без тары;
- г) использовать грязную и мокрую тару;
- д) брать равновесия пальцами и из разных комплектов разновесов.

Измерение количества электрической энергии

В зависимости от наличия приборов и специфики экспериментальной установки могут измеряться сила тока I , напряжение U , электрическое сопротивление цепи R , мощность W и энергия Q , потребляемые установкой. Количество энергии, если оно не измеряется непосредственно, может быть вычислено по следующей зависимости:

$$Q = I \cdot U \cdot \tau = I^2 \cdot R \cdot \tau = \frac{U^2}{R} \tau = W \tau, \quad (5)$$

где τ - время потребления энергии.

В системе СИ энергия может определяться в джоулях и килоджоулях.

Сила тока измеряется амперметром, напряжение - вольтметром, электрическое сопротивление установки - омметром или измерительным мостом, количество энергии - электросчетчиком. Амперметр, вольтметр, ваттметр и омметр являются, как правило, стрелочными приборами. В них преобразуется измеряемая электрическая величина в механическую силу (вращательный момент), под действием которой приводится в движение подвижная часть механизма.

Перечисленные приборы классифицируются по многочисленным признакам, наиболее важными из которых являются максимальные и минимальные измеряемые величины, точность производимых измерений, особенности установки и принципиальная схема прибора. Предел максимальных измерений прибора или максимальное показание шкалы указывается непосредственно на приборе, например, 2 А или 75 В и т. д. Выше указанной цифры нагружать прибор нельзя, так как он будет тотчас выведен из строя. Минимальный предел измерений либо также указывается на приборе, либо устанавливается по шкале, ниже которой прибор теряет чувствительность. Точность показаний прибора регламентируется его классом точности, обычно задаваемой в процентах от максимального показания шкалы. Цифрой, означающей указанный процент, помечают каждый прибор. Так, для вольтметров, амперметров и ваттметров она помещается в правом нижнем углу шкалы. Например, цифра 1,5 в амперметре с пределом измерений 2,5 А означает, что гарантированная погрешность показаний составляет не более

$$\Delta a = \mp \frac{1,5 \cdot 2,5}{100} = 0,375 A .$$

В зависимости от места установки различают приборы настольные, переносные и щитовые. К настольным относятся обычные лабораторные приборы сравнительно высокой точности. Приборы повышенной точности устанавливаются обязательно в определенном положении (горизонтально, вертикально и т. д.), для чего они снабжены ватерпасом. Переносные приборы, как правило, менее точны и предназначены для производства разовых измерений непосредственно на рабочем месте при проверке или контроле электрических схем. Щитовые приборы устанавливаются на панелях щитов и служат для постоянного измерения и контроля.

В зависимости от принципиальной схемы прибора существует множество модификаций. Укажем лишь главные из них. Для измерения мощности, силы тока и напряжения могут быть использованы приборы постоянного (магнитоэлектрические системы) и переменного (электромагнитные системы) токов, либо предназначенные для производства измерений в цепях постоянного и переменного токов

(электродинамические системы). Приборы, предназначенные для работы в цепях постоянного тока, могут быть снабжены выпрямительными устройствами, позволяющими их включать в цепь переменного тока.

Включение этих приборов в цепь, как правило, производится по схеме (рис. 10).

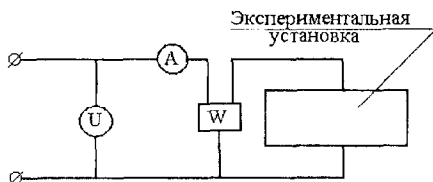


Рис. 10. Схема включения в цепь вольтметра, амперметра и ваттметра

Как видно из схемы, вольтметр включается параллельно нагрузке, а амперметр последовательно. Ваттметр, поскольку он одновременно измеряет силу тока и напряжение, соответственно снабжен четырьмя клеммами: две токовые включаются последовательно, и две напряжения – параллельно. Электросчетчик включается аналогично ваттметру.








Омметр и измерительный мост в измерительную схему не включаются, а служат для предварительного замера электрического сопротивления отдельных участков цепи, В зависимости от назначения, точности и конструктивных особенностей имеется значительное количество модификаций этих приборов. При их использовании необходимо точно придерживаться прилагаемой к ним инструкции.

Для удобства пользования стрелочными приборами существует единая стандартная система условных обозначений, помещенная на шкале прибора. По этому условному обозначению можно установить основные данные прибора.

Таблица 2

Условные обозначения на шкале прибора

№ п/п	Система и техническая характеристика прибора	Условные обозначения
1	2	3
1	Магнитоэлектрическая с подвижной рамкой	

1	2	3
2	Электромагнитная	
3	электродинамическая	
4	Тепловая	
5	Магнитоэлектрическая с термопреобразованием	
6	Электростатическая	
7	Магнитоэлектрическая с полупроводниковым (диодным) преобразователем	
8	Класс точности прибора (например, 2,5)	2,5
9	Изоляция измерительной цепи прибора испытана напряжением(например, 2 кВ)	
10	Прибор для включения в цепь постоянного тока	—
11	То же для переменного	~
12	То же для переменного и постоянного тока	R
13	Рабочее положение шкалы вертикальное	\perp
14	Рабочее положением шкалы горизонтальное	\square

Измерение количества тепловой энергии

Из известных способов определения количества тепловой энергии широкое распространение получили следующие:

- 1) электрометрический;
- 2) энтальпийный;
- 3) с использованием теплоты фазового превращения;
- 4) электротепловой или гидродинамической аналогии;
- 5) дополнительной стенки;
- 6) фотоэлектрический.

Электрометрический – наиболее простой способ измерения тепловой энергии. Он возможен лишь там, где источником теплоты является электрический нагреватель. Тогда, измерив мощность или электрическую нагрузку нагревателя одним из описанных выше способов, можно установить количество выделившейся на нагревателе теплоты.

Энтальпийный метод получил самое широкое распространение. Сущность его заключается в том, что количество теплоты определяется путем замера изменения температурного потенциала какой-нибудь субстанции и её количества в процессе получения или отдачи определенной величины тепловой энергии. Зная теплофизические характеристики субстанции, можно определить количество теплоты, полученное или отданное ею.

Способ с использованием теплоты фазового превращения широко используется в измерительной практике, особенно, если при этом удобно измерить количество превращенной субстанции. Так, например, конденсация пара при заданном давлении является процессом изотермическим. Если можно определить количество полученного конденсата, то количество тепловой энергии, которую отдал пар, определяется по формуле

$$Q = M \cdot r, \quad (6)$$

где M - масса сконденсированного пара, кг;

r - теплота фазового перехода, кДж/кг.

Этот способ в известном смысле может рассматриваться и как разновидность энтальпийного. При этом количество теплоты определяется по формуле

$$Q = (h_x - h_k) \cdot M, \quad (7)$$

здесь h_x и h_k - энтальпия влажного насыщенного пара и конденсата соответственно, кДж/кг.

Наиболее широкое распространение при измерении тепловой энергии получил метод дополнительной стенки. Этот метод состоит в том, что тепловой поток проходит через пластину (плиту) с заранее известными теплофизическими характеристиками, к которым, в первую очередь, относится коэффициент теплопроводности λ . Если режим стационарный, то достаточно одной этой характеристики. Измерив температуру пластины с обеих сторон, можно определить тепловой поток, пронизывающий ее по нормали, по выражению

$$Q = F(T_2 - T_1) \frac{\lambda}{\delta} \tau, \quad (8)$$

где F – площадь поверхности пластины, м^2 ;

T_1 и T_2 – температуры поверхностей пластины, К ;

δ – толщина пластины, м ;

τ – время, с .

Для определения тепловых потоков через ограждения применяются плоские тепломеры. Они представляют собой чаще всего круглую плоскую плиту из плохо проводящего теплоту материала. По обе стороны этой плиты расположены спаи батарей дифференциальных термопар. Чем тоньше толщина тепломера и чем больше термопар содержит батарея, тем точнее показания прибора. Этот прибор обычно предварительно градуируется по известной величине теплового потока.

Иногда для определения теплового лучистого потока применяются фотоэлементы, в которых лучистая энергия сразу превращается в электрическую. Измерив электрический потенциал фотоэлемента, можно судить о потоке лучистой энергии. Этот способ измерения называется фотоэлектрическим.

Как уже указывалось, существует много способов и модификаций каждого из них для определения потока тепловой энергии. Прежде чем выбрать способ измерения и его модификацию, необходимо хорошо разобраться в его физической основе, насколько она отвечает изучаемому процессу.

Измерение влажности воздуха

Для определения относительной влажности воздуха φ применяют различные методы: психрометрический, гигроскопический, точки росы, весовой и т.д.

Психрометрический метод основан на открытии русского ученого Рихмана (XVIII), заключающегося в следующем. Если шарик ртутного термометра обернуть влажной тканью, то, находясь в ненасыщенном воздухе, этот термометр (мокрый) покажет более низкую температуру, чем обычный (сухой) термометр. Это объясняется тем, что при соприкосновении ненасыщенного воздуха с поверхностью тонкой пленки воды начинается испарение последней и перенос её в воздух. Интенсивность испарения воды определяется разностью парциальных давлений водяного пара у поверхности влажной ткани p_n и в окружающем влажном воздухе p_n . Фазовый переход

"жидкость-пар" сопровождается поглощением теплоты парообразования, отбираемой, в первую очередь, от самой жидкости. Вследствие происходящего тепло- и влагообмена температура воды во влажной ткани будет понижаться и если бы не было притока теплоты к мокрому термометру извне, то температура воды снизилась бы до температуры точки росы t_p для данного парциального давления водяного пара p_n во влажном воздухе. В действительности же снижение температуры влажной ткани сопровождается возникновением потока теплоты к ней от влажного воздуха за счет разности температур $t_n - t_c$. Температура влажной ткани повышается, испарение воды возрастает. Наступает такой момент времени, когда между потоком теплоты от воздуха к поверхности влажной ткани и потоком теплоты, необходимой для испарения воды, устанавливается термодинамическое равновесие, но не при температуре точки росы t_p , а при более высокой температуре t_m . Характерно, что при этом энтальпия воздуха мало изменяется, так как отданная воде теплота возвращается обратно в воздух в скрытом виде вместе с испаренной водой. Такой процесс испарения условно называют адиабатическим.

Температура, соответствующая наступлению термодинамического равновесия между влажным воздухом и водой, содержащейся во влажной ткани, называется температурой мокрого термометра, определяемая по формуле

$$t_m = t_c - \frac{r_m \cdot (d_m - d)}{c_{p,v} + c_{p,n} \cdot d},$$

где r_m и d_m – соответственно теплота парообразования и влагосодержание насыщенного воздуха при температуре мокрого термометра.

В технике измерения влажности воздуха нашли применение психрометр Августа и психрометр Ассмана. Основным элементом как одного, так и другого являются два термометра. Шарик одного из них обернут влажной тканью, с поверхности которого происходит испарение. В момент, когда наступает термодинамическое равновесие между потоком теплоты от воздуха к поверхности и потоком теплоты, необходимой для её испарения, мокрый термометр психрометра регистрирует температуру t_m , а сухой – температуру окружающего влажного воздуха t_c . Для получения более точных данных необходимо, чтобы шарик термометра во время опыта был

смочен водой и приток за счет лучеиспускания к нему был минимальным. В связи с изложенным, посредством психрометра Августа нельзя точно определить относительную влажность ϕ . Причин несколько:

1) шарик мокрого термометра не защищен от теплового воздействия окружающих поверхностей, температура которых может отличаться от его температуры;

2) температура столбика ртути в термометре по высоте неодинакова и поэтому возникает теплообмен между различными частями самого термометра;

3) скорость воздуха, омывающего смоченную поверхность шарика, оказывает влияние на величину $(t_c - t_m)$;

4) на процесс испарения оказывает влияние барометрическое давление; следует вводить поправку $\frac{P_0}{p}$ ($p_0 = 101325 \text{ Па}$).

Психрометр Ассмана – более совершенный прибор. Оба термометра заключены в металлические, отполированные трубки, по которым проходит исследуемый воздух со скоростью $2,5 \dots 3,0 \text{ м/с}$. Движение воздуха вдоль термометров обеспечивает вентилятор, который вмонтирован в корпус психрометра. Показания мокрого термометра более точны, чем у психрометра Августа, и ближе к пределу охлаждения.

По соответствующим таблицам (Приложение 9 и 10) или по $h-d$ диаграмме влажного воздуха, зная значения t_c и t_m , определяется относительная влажность воздуха ϕ .

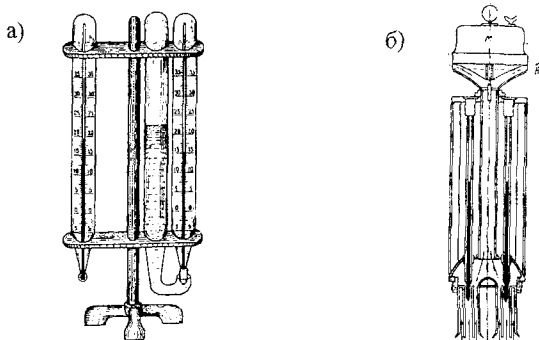


Рис. 11. Психрометры:
а) Августа; б) Ассмана

Гигроскопический метод основан на способности некоторых материалов приводить свою влажность в равновесное состояние с влажностью воздуха (результат поглощение влаги из воздуха). Изменение влажности гигроскопического материала сопровождается изменением его свойств, например, электропроводности. Обезжиренный человеческий волос, древесное волокно, капроновая нить и др. при изменении ϕ воздуха деформируются, что отражает движение стрелки гигрометра. Его шкала отградуирована в величинах ϕ .

На рисунке 12 представлен электропсихрометр с гигроскопической солью LiCl . Когда воздух сухой, то соль не проводит электрический ток. При повышении влажности воздуха соль насыщается влагой и становится проводником. Чем больше влаги абсорбируется солью, тем выше проводимость. Если элемент включить в систему моста, то можно измерить силу тока и, следовательно, влажность воздуха.

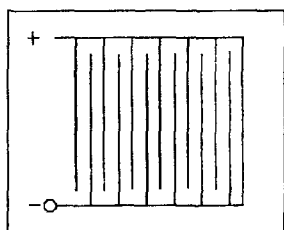


Рис. 12. Электропсихрометр с гигроскопической солью

Для определения влажности воздуха методом точки росы применяют гигрометр, состоящий из двух термометров, шарики которых заключены в металлические резервуары (рис. 13). Наружные поверхности резервуаров отполированы (защита от теплового облучения), свободное пространство левого резервуара заполнено эфиром. В верхнюю крышку его впаяны две трубки, одна из которых не достигает дна. В трубку нагнетается воздух. Пузырьки воздуха вызывают интенсивное испарение эфира и, следовательно, его охлаждение. Воздух, прошедший через слой эфира, выходит через другую трубку.

Когда температура наружной поверхности резервуара понизится до значения точки росы t_p воздуха, на поверхности образуются капли конденсата, выпавшего из воздуха. Показания левого термометра в момент начала затуманивания отполированной поверхности

и есть точка росы воздуха t_p . По Приложению 7 находят величину упругости насыщенного пара для температур t_p и t_n (показания термометров) и определяют относительную влажность воздуха

$$\varphi = \frac{\rho_p}{\rho_n} . \quad (9)$$

Метод точки росы менее точен, чем психрометрический.

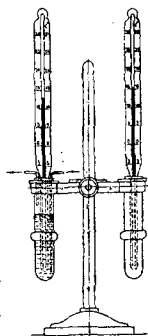


Рис. 13. Гигрометр

Весовой метод является самым точным, но трудоемким. Исследуемый воздух просасывается вентилятором 1 (рис. 14) через несколько последовательно соединенных U-образных трубок 2, заполненных гигроскопическим веществом (хлористый кальций, фосфорный ангидрид). Трубки с наполнителем предварительно взвешивают. Затем после прохождения воздуха их снова взвешивают уже с водяным паром. Разность масс Δm и есть количество водяного пара, содержащегося в пропущенном через трубки объеме воздуха, который измеряется газовым счетчиком 3.

Объемная влажность воздуха определяется из отношения

$$\rho_n = \frac{\Delta M}{V} , \text{ кг/м}^3 , \quad (10)$$

где ΔM – разность масс, кг;
 V – объем воздуха, м^3 .

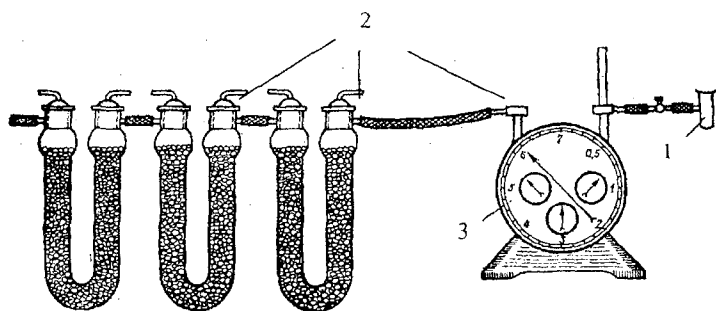


Рис. 14. Схема установки измерения влажности воздуха весовым методом

Оценка погрешности эксперимента

Необходимо различать прямые и косвенные измерения. При прямых измерениях значения искомых величин находят непосредственно по показаниям измерительных приборов, а при косвенных – как функцию из результатов непосредственных измерений других величин. Например, измерения массы на циферблатных весах, температуры термометром – это прямые измерения, а нахождение плотности однородного тела по его массе и геометрическим размерам – это косвенные.

Ни один эксперимент не может быть произведен абсолютно точно вследствие неточности самих приборов и неизбежных погрешностей, возникающих в процессе измерений.

Точностью измерений называется качество измерений, отражающее близость их результатов к истинному значению измеряемой величины. Чем меньше погрешность измерений, тем ближе значение измеряемого параметра к истинному. Количественно точность измерений может быть выражена величиной модуля относительной погрешности. Например, если погрешность измерений равна 10^{-4} , то точность равна 10^4 .

Основной мерой точности может служить средняя квадратичная ошибка, определяемая по формуле

$$m = \sqrt{\frac{[\Delta^2]}{n}}, \quad (11)$$

где $[\Delta^2] = \Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \dots + \Delta_n^2$ - сумма квадратов истинных случайных ошибок;
 n - число измерений.

В свою очередь, средняя ошибка определяется по формуле

$$\theta = \frac{[|\Delta|]}{n}, \quad (12)$$

где $[|\Delta|] = |\Delta_1| + |\Delta_2| + \dots + |\Delta_n|$ - это сумма абсолютных значений случайных ошибок.

Связь между средней и средней квадратической ошибками может быть выражена соотношением

$$\theta \approx 0,8 \cdot m. \quad (13)$$

Для оценки точности равноточных измерений (измерения, производимые в одинаковых условиях) одной и той же случайной величины необходимо выполнить следующие операции.

1. Определяем среднее арифметическое из результатов одинаково точных измерений

$$\bar{x} = x_0 + \frac{[\varepsilon_i]}{n}, \quad (14)$$

где x_0 - приближенные значения измеряемой величины;

ε_i - отклонение x_i от x_0 ($\varepsilon_i = x_i - x_0$, $i = 1, 2, \dots, n$);

n - число измерений.

2. По формуле Бесселя вычисляют среднюю квадратичную ошибку отдельного измерения

$$m = \sqrt{\frac{[V^2]}{n-1}}. \quad (15)$$

Здесь V - отклонение от арифметической середины \bar{x} , т.е.

$$V_i = x_i - \bar{x}.$$

3. Определяют надежность величины m , т.е. средней квадратичной ошибки, из выражения

$$m_m = \frac{m}{\sqrt{2(n-1)}}. \quad (16)$$

Контролем вычисления служит равенство $[V] = 0$. В том случае, когда $\frac{[\varepsilon]}{n}$, имеет место ошибка округления $\beta = x$, принятое x точное, то должно быть $[V] = n \cdot \beta$.

4. Контролируют вычисление ошибки m по формуле Петерса

$$m = 1,25 \cdot \frac{[|V|]}{n - 0,5}. \quad (17)$$

5. Вычисляют среднюю квадратичную ошибку арифметической середины по формуле

$$M = \frac{m}{\sqrt{n}}, \quad (18)$$

или

$$M = \sqrt{\frac{[V^2]}{2 \cdot (n-1)}}. \quad (19)$$

6. Определяют надежность вычисления ошибки

$$m_m = \frac{M}{\sqrt{2 \cdot (n-1)}}. \quad (20)$$

При обработке результатов неравноточных измерений (измерения, производимые в разных условиях) различная их точность учитывается путем введения вспомогательных чисел – весов. Вес – это величина, обратно пропорциональная квадрату средней квадратичной ошибки,

$$\rho = \frac{C}{m^2}, \quad (21)$$

где C – произвольная постоянная.

Давая анализ погрешностей измерений, необходимо различать абсолютную и относительную ошибки опыта.

Абсолютной ошибкой ΔX приближенного значения величины X называется разность между ее истинным x и приближенными значениями

$$X - x = \pm \Delta x. \quad (22)$$

Понятно, что из формулы (22) абсолютную ошибку Δx определить нельзя, так как неизвестно истинное значение X . При непосредственных измерениях абсолютная ошибка определяется на основе учета точности измерительного прибора, точности отсчета.

Ошибка результата измерения, обусловленная неточностью отсчета, определяется по формуле

$$\Delta x_{отсч.} = \pm \Delta n \cdot \omega, \quad (23)$$

где Δn – абсолютная ошибка отсчета;

ω – цена одного деления отсчета.

Максимальной абсолютной ошибкой результата измерения, обусловленной неточностью отсчета, является половина цены одного деления шкалы

$$\Delta x_{отсч.} = \pm 0,5 \cdot \omega. \quad (24)$$

Абсолютной ошибкой ΔY приближенного значения функции $y = f(x_1; x_2 \dots x_n)$ называется разность между её истинным и приближенными значениями

$$\Delta y = Y - y. \quad (25)$$

Так как истинные значения аргументов указать нельзя, то и истинное значение функции Y неизвестно. Поэтому задача сводится к

тому, чтобы абсолютную ошибку функции выразить через приближенные значения аргументов ($x_1; x_2 \dots x_n$), их абсолютные ($\Delta x_1, \Delta x_2 \dots \Delta x_n$) и относительные ($\Delta \varepsilon_{x_1}, \varepsilon_{x_2}, \dots, \varepsilon_{x_n}, x_1$) ошибки. Относительной ошибкой ε_x приближенного значения величины x называется отношение её абсолютной ошибки Δx к приближенному значению данной величины X

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta x}{X}, \quad (26)$$

Относительной ошибкой приближенного значения функции называется отношение её абсолютной ошибки к её приближенному значению

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta y}{Y}. \quad (27)$$

Ошибки косвенно измеряемых величин рассматриваются как ошибки элементарных функций, таких как сумма, разность, произведение, частное, степень и т.д., которые дают возможность вывести формулы ошибок для более сложных функций, представляющих ту или иную комбинацию из указанных выше. Но даже для несложных функций такой способ вывода формулы погрешностей является трудоемким. Поэтому для вывода формул погрешностей более сложных функций удобнее пользоваться методами дифференциального исчисления.

Результат расчета относительной ошибки записанного числа по выражению (27) в основном определяется первой значащей цифрой записи. Другие цифр, стоящие справа от первой значащей можно отбросить и не учитывать.

Более подробные сведения по данному вопросу можно найти в специальной литературе, например, в [4].

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

Лабораторная работа № 1

Определение основных термодинамических параметров воздуха

Ц е л ь р а б о т ы : закрепление сведений об основных термодинамических параметрах системы, единицах измерения, основных уравнениях состояния, экспериментальное определение давления, температуры, удельного объема, кажущейся молекулярной массы и газовой постоянной воздуха.

Основные положения теории

Объект исследования в термодинамике называется термодинамической системой или рабочим телом, физические величины, характеризующие систему в состоянии равновесия, — параметрами состояния системы. Они относятся к системе в целом, не зависят от её истории и изменяются только в результате взаимодействия системы с окружающей средой. Основными параметрами состояния системы являются: абсолютное давление p , абсолютная температура T и удельный объем v .

Давление представляет собой силу, с которой частицы системы действуют на единицу площади стенки сосуда, в котором заключена система. Абсолютное давление p определяют по показаниям двух приборов — барометра и манометра или вакуумметра. Если абсолютное давление в сосуде больше барометрического p_b , то

$$p = p_b + p_m,$$

если меньше, то

$$p = p_b - p_{\text{вак}},$$

где p_m — манометрическое (избыточное) давление;

$p_{\text{вак}}$ — давление разрежения.

В системе СИ единицей измерения давления является паскаль (Па). 1 Па — это давление, вызываемое силой 1 Н, равномерно распределенной по поверхности площадью 1 м², т.е. Па = Н/м².

Соотношение между различными единицами измерения давления приведены в Приложении 4.

Температура является мерой интенсивности хаотического движения молекул, из которых состоит система. В настоящее время применяют различные температурные шкалы для измерений температуры.

Термодинамическая температурная шкала установлена по температуре, при которой лед (твердая фаза), вода (жидкая фаза) и пар (газовая) находятся в равновесии друг с другом, т. е. по температуре тройной точки воды. Температуре тройной точки химически чистой воды присвоено значение абсолютной температуры 273,16 К. Начало отсчета по термодинамической шкале соответствует $-273,15^{\circ}\text{C}$.

В инженерной практике часто используется международная столбградусная шкала Цельсия. Интервал температур от точки плавления льда при нормальном давлении ($T = 273,15\text{ К}$) до точки кипения воды ($T = 373,15\text{ К}$) разбит на сто равных частей. 1/100 этого интервала соответствует 1°C .

Температура T , выраженная в Кельвинах, связана с температурой в градусах Цельсия соотношением

$$T = t + 273,15, \text{ К.}$$

В ряде стран используют температурные шкалы Фаренгейта, Ренкина, Реомюра [1].

Удельный объем вещества представляет собой отношение объема системы V к заключенной в нем массе вещества M

$$v = \frac{V}{M}, \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Состояние системы однозначно определено, если известны два интенсивных (не зависящих от количества вещества) независимых параметра. Например,

$$\begin{aligned} v &= f_1(p, T); \\ T &= f_2(p, v); \\ p &= f_2'(T, v). \end{aligned} \tag{1.1}$$

Основные параметры состояния связаны между собой уравнением состояния

$$F(p, v, T) = 0. \quad (1.2)$$

В термодинамике часто в качестве исследуемого объекта используется идеальный газ. С физической точки зрения идеальный газ состоит из молекул, которые не испытывают взаимного притяжения и отталкивания и размерами которых можно пренебречь, по сравнению с размерами межмолекулярного пространства. Идеальный газ подчиняется уравнению состояния, которое называется уравнением Клапейрона:

для 1 кг газа

$$p \cdot v = R \cdot T, \quad (1.3)$$

для M кг газа

$$p \cdot V = M R \cdot T,$$

где R – газовая постоянная, определяющая индивидуальные свойства идеального газа, Дж/(кг·К).

Газовая постоянная представляет собой работу 1 кг газа в изобарном процессе при изменении температуры на один градус; определяется по формуле

$$R = \frac{(\mu R)}{\mu}. \quad (1.4)$$

Согласно закону Авагадро, одинаковые объемы различных идеальных газов при одинаковых p и T содержат одинаковое количество молекул. Поскольку 1 кмоль любого вещества содержит одно и то же количество молекул, то произведение молекулярной массы любого идеального газа на его удельный объем величина постоянная, т. е. $\mu v = \text{const}$.

Умножив обе части уравнения (1.3) на μ , получим

$$p \cdot (\mu v) = (\mu R) T. \quad (1.5)$$

При заданных значениях p и T произведение $(\mu\nu)$ одинаково для всех газов. Следовательно, в правой части уравнения (1.5) для всех идеальных газов должна быть одинакова величина (μR) . Таким образом, величина (μR) не зависит ни от вида идеального газа, ни от его состояния. Эта величина называется универсальной газовой постоянной. Поскольку (μR) выведена Д.И. Менделеевым, то уравнение (1.5) называют уравнением Клапейрона – Менделеева. Для вычисления величины (μR) из (1.5) используются нормальные физические условия (НФУ): $T_0 = 273,15 \text{ К}$, $p_0 = 101325 \text{ Па}$.

$$\mu R = \frac{p_0 \cdot (\mu\nu)}{T_0} = \frac{101325 \cdot 22,4143}{273,15} = 8314,2 \text{ Дж/(кмоль}\cdot\text{К)}, \quad (1.6)$$

где $(\mu\nu) = 22,4143 \text{ м}^3/\text{кмоль}$ – объем 1 кмоль идеального газа при НФУ.

Зная универсальную газовую постоянную, можно рассчитать газовую постоянную любого газа по (1.4).

Плотность газа при НФУ определяется выражением

$$\rho_0 = \frac{p_0}{RT_0} = \frac{\mu}{22,4}, \text{ кг/м}^3. \quad (1.7)$$

Решая совместно (1.3) и (1.7), получаем

$$\rho = \frac{\mu}{22,4} \cdot \frac{p}{p_0} \cdot \frac{T}{T_0}. \quad (1.8)$$

Данная работа предусматривает определение абсолютного давления, абсолютной температуры, удельного объема, кажущейся молекулярной массы и газовой постоянной окружающего воздуха, который при атмосферном давлении и умеренных температурах можно считать идеальным газом. Давление и температура измеряются непосредственно, все остальные величины определяются расчетным путем на основании результатов эксперимента.

Для определения массы воздуха в сосуде поступаем следующим образом.

Испытываемую систему приводим в два различных равновесных состояния, выполняя ряд требований: постоянство температуры в обоих состояниях $T_1 = T_2 = T$ и объемов $V_1 = V_2 = V$ (объем системы равен объему сосуда, в котором она заключена, т. к температура системы постоянна и механическая прочность стенок сосуда позволяет пренебречь их деформацией при изменении давления системы от p_1 до p_2).

Для каждого из этих равновесных состояний воздуха запишем уравнения Клапейрона

$$p_1 V_1 = M_1 RT, \quad (1.9)$$

$$p_2 V_2 = M_2 RT, \quad (1.10)$$

где M_1 и M_2 - масса воздуха при давлении p_1 и p_2 соответственно.

Вычитая (1.9) из (1.10) и разделив на (1.9) получим

$$\frac{p_2 - p_1}{p_1} = \frac{M_2 - M_1}{M_1}. \quad (1.11)$$

Вычитая поочередно массу сосуда с воздухом при давлениях p_1 и p_2 (M'_1 и M'_2), находим приращение массы воздуха

$$\Delta M = \Delta M' = M'_2 - M'_1 = M_2 - M_1. \quad (1.12)$$

Из (1.11) с учетом (1.12) получаем

$$M_1 = \Delta M \frac{p_1}{p_2 - p_1} = (M'_2 - M'_1) \frac{p_1}{p_2 - p_1}, \quad (1.13)$$

Зная массу воздуха M_1 , содержащегося в объеме сосуда V , можно найти следующие величины

удельный объем воздуха при начальных условиях p_1 и T

$$v = \frac{V}{M_1}; \quad (1.14)$$

удельный объем воздуха при нормальных физических условиях

$$v_o = v \cdot \frac{p \cdot T_o}{p_o \cdot T}, \quad (1.15)$$

где p_o – давление воздуха при НФУ, Па;

T_o – температура воздуха при НФУ, К;

кажущуюся молекулярную массу при нормальных физических условиях

$$\mu = \frac{22,4}{v_o}; \quad (1.16)$$

газовую постоянную воздуха

$$R = \frac{p_1 \cdot V}{M_1 \cdot T}, \quad (1.17)$$

универсальную газовую постоянную воздуха

$$(\mu R) = R \cdot \mu. \quad (1.18)$$

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рис. 1.1) состоит из тонкостенного алюминиевого цилиндра 1 объемом $V = 800 \text{ см}^3$, ручного компрессора 2 и шлангов 3, которыми соединен компрессор с цилиндром. На шлангах установлены зажим 4 и разъемная муфта 5. Для замера давления воздуха установлен манометр 6. Для измерения атмосферного давления используется барометр.

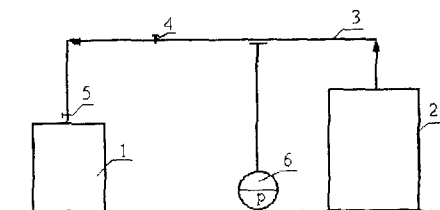


Рис. 1.1. Схема экспериментальной установки
Методика проведения эксперимента

Эксперимент проводится в следующей последовательности. По термометру определяется температура окружающего воздуха t , по барометру – атмосферное давление p_6 . Определяется масса цилиндра с находящимся в нем воздухом M'_1 при атмосферном давлении p_6 .

Затем цилиндр присоединяется к шлангу 3 при помощи муфты 5. Компрессором 2 в цилиндр нагнетается воздух до давления $0,07 \dots 0,1$ МПа, после чего шланг зажимается зажимом 4. Давление измеряется в момент его стабилизации. Последнее вызвано тем обстоятельством, что при политропном сжатии воздуха в компрессоре температура его увеличивается и становится выше температуры окружающей среды, а после закрытия зажима 4 происходит изохорное понижение температуры воздуха в цилиндре вследствие теплообмена с окружающей средой. Давление при этом также изменяется и становится начальным лишь при наступлении температурного равновесия с окружающей средой.

Измерив манометром избыточное давление в цилиндре p_m , последний при зажатом зажиме 4 отсоединяют от шлангов 3 и повторно взвешивают (M'_2).

Все данные, полученные в результате эксперимента, заносим в табл. 1.1.

Т а б л и ц а 1.1

Экспериментальные данные

Параметры окружающего воздуха					Масса цилиндра с воздухом при $p_1 = p_6$ M'_1 , кг	Избыточное давление в цилиндре p_m		Абсолютное давление в цилиндре $p_2 = p_m + p_6$	Масса цилиндра с воздухом при p_2 M'_2 , кг
температура,		барометрическое давление p_6				кгс/см ²	МПа		
t , °С	T, К	мм рт. ст.	МПа	МПа					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Обработка экспериментальных данных

Обработка экспериментальных данных производится в следующей последовательности.

На основании данных таблицы определяются:

разность ΔM – по выражению (1.12);

по (1.13) – масса воздуха в цилиндре M_1 при давлении $p_1 = p_6$;

по (1.14) – удельный объем v при давлении $p_1 = p_6$;

по (1.15) – удельный объем v_0 при нормальных физических условиях;

по (1.16) – кажущаяся молекулярная масса μ воздуха при нормальных физических условиях;

по (1.17) – газовая постоянная воздуха R ;

по (1.18) – универсальная газовая постоянная воздуха (μR).

Все расчеты сводим в табл. 1.2.

Т а б л и ц а 1.2

Результаты обработки экспериментальных данных

№ п/п	M_1 , кг	v , м ³ /кг	v_0 , м ³ /кг	μ , кг/кмоль	R , Дж/(кг·К)	μR , Дж/(кмоль·К)
1	2	3	4	5	6	7

По результатам расчета сделать анализ полученных данных и сформулировать выводы.

К о н т р о л ь н ы е в о п р о с ы

1. Основные термодинамические параметры состояния системы.
2. Единицы измерения давления и соотношения между ними.
3. Какими приборами измеряется давление?
4. Соотношения между абсолютным, барометрическим и избыточным (вакуумом) давлениями.
5. Какие условия называются нормальными физическими?
6. Что представляет собой идеальный газ?
7. Физический смысл газовой и универсальной газовой постоянной.
8. Формы записи уравнения состояния.
9. Почему значение (μR) одинаково для всех идеальных газов независимо от их индивидуальных свойств?

Лабораторная работа № 2

Определение зависимости температуры кипения воды от давления

Ц е л ь р а б о т ы : закрепление основных сведений по устойчивому равновесному состоянию гетерогенной однокомпонентной системы; ознакомление с особенностями фазового перехода первого рода; изучение свойств воды по термодинамическим таблицам и фазовой диаграмме воды; экспериментальное определение зависимости между температурой и давлением насыщения на кривой парообразования.

Одно и то же вещество в зависимости от внешних условий (давление и температура) может находиться в различных агрегатных состояниях – твердом, жидком и газообразном. Такую термодинамическую систему, состоящую из различных по своим свойствам частей, отделенных одна от другой поверхностями раздела, называют гетерогенной. Каждая гомогенная (однородная, сплошная) часть гетерогенной системы, ограниченная поверхностью раздела и характеризующаяся одинаковыми физическими свойствами во всех точках, называется фазой. Таким образом, фаза может рассматриваться как гомогенная термодинамическая система. В то время как в природе существуют всего три агрегатных состояния, число фаз может быть неограниченным. Например, твердое вещество может сосуществовать в нескольких фазах, отличающихся между собой кристаллическими модификациями.

Фазовый переход представляет собой переход вещества из одной фазы в другую через поверхность раздела фаз. Различают фазовые переходы первого и второго рода.

Отличительной особенностью фазового перехода первого рода является скачкообразное изменение удельного объема v и удельной энтропии s

$$\Delta v = v'' - v'; \Delta s = s'' - s'. \quad (2.1)$$

Вследствие скачкообразного изменения энтропии фазовые переходы первого рода протекают с поглощением или выделением теплоты,

называемой теплотой фазового перехода. К таким переходам относятся изменения агрегатного состояния (испарение, конденсация, плавление, сублимация, затвердевание, возгонка) или переход вещества в различные кристаллические модификации (например, уголь – алмаз).

Фазовый переход второго рода имеют некоторые металлы в процессе перехода в сверхпроводящее состояние, перехода металлов из ферромагнитного в парамагнитное состояние и др. При фазовом переходе второго рода не происходит скачкообразного изменения объема и энтропии, а следовательно, нет и теплоты фазового перехода. Характерным признаком здесь является скачок в значениях удельной теплоемкости, коэффициентов термической расширяемости и сжимаемости.

Для инженеров энергетических специальностей представляет ббльший интерес фазовый переход первого рода.

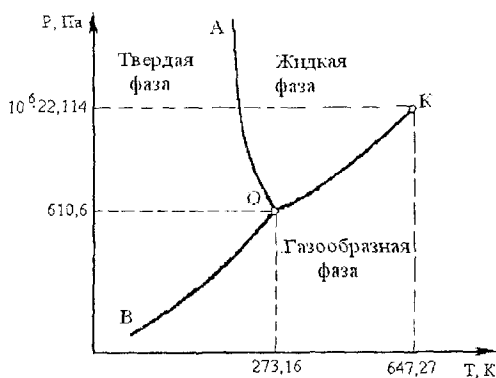


Рис. 2.1. Фазовая диаграмма воды

Рассмотрим однокомпонентную систему. На кривой фазового перехода в $p - T$ - диаграмме состояние, в котором сосуществуют три фазы – твердая, жидкая и газообразная, изображается точкой O, называемой тройной точкой (рис. 2.1). Для воды тройной точке соответствует $T_0 = 273,16$ К и давление $p_0 = 610,8$ Па.

На диаграмме линия OA представляет собой кривую плавления (затвердевания), линия ОК – кривую кипения (конденсации), а линия OB – кривую сублимации.

Линия насыщения ОК заканчивается в критической точке К, имеющей параметры

для $T_{кр} = 647,27$ К, $p = 22,114 \cdot 10^6$ Па, $v_{кр} = 0,00326$ м³/кг. Критическая точка соответствует критическому состоянию вещества, когда теплота парообразования равно 0 и обе равновесно сосуществующие фазы (жидкость и пар) становятся тождественными, т. е. исчезают различия между ними. Критическая точка является конечной точкой линии фазового перехода "жидкость-пар".

Для однокомпонентной двухфазной системы (жидкость – пар), находящейся в равновесии справедливо уравнение Клапейрона – Клаузиуса

$$\frac{dp_n}{dT_n} = \frac{r}{T_n \cdot (v'' - v')}, \quad (2.2)$$

где p_n – давление насыщения, при котором происходит фазовый переход первого рода, Па;

T_n – температура насыщения жидкости при p_n , К;

r – теплота фазового перехода, в данном случае – теплота парообразования, кДж/кг;

v' и v'' – удельные объемы воды в состоянии насыщения (кипения) и сухого насыщенного пара соответственно, м³/кг.

Отношение $\frac{dp_n}{dT_n}$ показывает, как меняется давление, при котором происходит фазовый переход "жидкость - пар", при изменении температуры. Производная давления насыщения по температуре $\frac{dp_n}{dT_n} > 0$ и

кривая парообразования, начинающаяся в тройной точке 0 и заканчивающаяся в критической точке К, всегда образуют положительный наклон с осью температур, т.е. температура насыщения возрастает с ростом давления, при котором осуществляется фазовый переход.

При переходе вещества из жидкого состояния в пар теплота парообразования r также положительна, а удельный объем вещества увеличивается, т.е. $\Delta v = v'' - v' > 0$.

Уравнение Клапейрона – Клаузиуса устанавливает зависимость между производной давления насыщения по температуре и калорическими (r) и термическими (v' , v'') свойствами вещества на линии насыщения.

Фазовое превращение жидкости в пар может происходить посредством испарения или кипения. Испарение – процесс парообразования на поверхности свободной жидкости при любой её температуре. Часть молекул, оторвавшихся от поверхности жидкости, под воздействием сил молекулярного притяжения, снова возвращается в жидкость. Пока концентрация молекул газа в окружающей паровоздушной смеси мала, процесс испарения превалирует над процессом конденсации.

С повышением парциального давления пара в паровоздушной смеси скорость испарения уменьшается, а скорость конденсации пара возрастает. Наступает момент, когда скорости обоих процессов становятся одинаковыми. Жидкость и пар приходят в состояние динамического равновесия. Пар, находящийся в динамическом равновесии с жидкостью, называется насыщенным.

При нагревании жидкости равновесие между ней и насыщенным паром смещается. Средняя скорость молекул с увеличением её температуры возрастает, и поэтому происходит дополнительное парообразование и парциальное давление насыщенного пара в паровоздушной смеси возрастает. Таким образом, температура и давление насыщенного пара взаимосвязаны, и каждой температуре соответствует определенное давление насыщения.

Процесс кипения представляет собой парообразование на поверхности и в объеме самой жидкости при строго определенной температуре – температуре кипения, которая является функцией внешнего давления и с увеличением его возрастает.

Для возникновения кипения температура жидкости должна несколько превышать температуру насыщения при давлении окружающей среды. Зависимость давления от температуры кипения представлена на рис. 2.2.

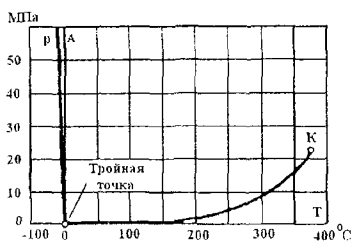


Рис. 2.2. Кривая кипения ОК и кривая плавления ОА для воды

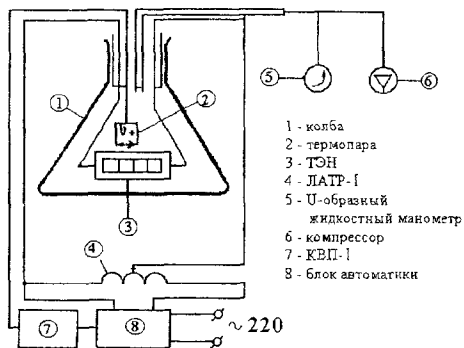


Рис. 2.3. Схема экспериментальной установки

Описание экспериментальной установки

Установка (рис. 2.3) состоит из стеклянной колбы 1, наполненной на 2/3 водой. В колбе находится термомпара 2, соединенная с потенциометром 7, и электрический нагреватель 3, на который через автотрансформатор 4 подается напряжение. Блок автоматики 8 – для контроля напряжения на нагревателе. Паровое пространство трубки соединено с U-образным ртутным манометром 5, который служит для измерения перепада давлений между паровым пространством и окружающей средой. Для создания вакуума в колбе используется компрессор 6. Атмосферное давление p_6 измеряется барометром.

Перед началом работы следует ознакомиться со схемой установки и проверить правильность включения приборов. Убедившись в отсутствие неисправностей, включают автотрансформатор 4 в электрическую сеть и медленным вращением его ручки подают напряжение в электронагреватель 3. Начальное напряжение составляет 25 В. С подачей напряжения на электронагреватель начнется процесс нагрева воды в трубке, сопровождающийся испарением, а затем кипением. По достижении температуры воды 30-35 °С записываются показания манометра с интервалом температуры 5 °С.

Опыт прекращается по достижении температуры воды 90 – 95 °С. Для получения зависимости $t_n = f(P_n)$ необходимо опыт повторить требуемое число раз.

Опыт можно проводить, создавая в колбе с помощью компрессора вакуум.

Данные эксперимента заносятся в табл. 2.1.

Т а б л и ц а 2.1

Результаты эксперимента и расчета

№ наблюдений	Температура жидкости $t, ^\circ\text{C}$	Давление в трубках манометра, мм рт. ст.		Суммарное манометрическое давление $h_1 + h_2$		Барометрическое давление p_6		Абсолютное давление p , МПа	Давление насыщения p_n (табличное), МПа
		h_1	h_2	мм рт. ст.	МПа	мм рт. ст.	МПа		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Обработка результатов эксперимента

Абсолютное давление в трубке, при котором происходит кипение воды, определяется по формуле

$$p = p_6 \pm (h_1 + h_2), \quad (2.3)$$

где p_6 – барометрическое давление, МПа;

$(h_1 + h_2)$ – избыточное (вакуумное) давление в колбе, МПа.

В уравнении знак "плюс" берется, если давление больше атмосферного, "минус" - если меньше. Значения p заносятся в табл.1. Кроме того, в таблицу заносят p_n из Приложения 7 (по температуре жидкости).

Результаты опыта обрабатываются в виде графика зависимости температуры кипения от давления $t_n = f(p)$, Для сравнения на этом же графике строится зависимость $t_n = f(p_n)$.

К о н т р о л ь н ы е в о п р о с ы

1. Какие системы называются гетерогенными, гомогенными?
2. Что называется фазовым переходом?
3. Особенности фазового перехода первого рода.
4. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса.
5. Фазовая диаграмма для воды.

6. Что представляет собой тройная точка?
7. Параметры воды в тройной точке.
8. Какое состояние вещества называется критическим?
9. Критические параметры воды.
10. Может ли кипеть вода при давлении ниже 610,6 Па?
11. Чем отличается испарение от кипения?
12. Какими приборами измеряется давление?
13. Соотношения между единицами измерения давления

Лабораторная работа № 3

Определение параметров влажного насыщенного пара воды

Цель работы: закрепление основных теоретических сведений, связанных с процессом парообразования; изучение $p - v$ и $h - s$ диаграмм водяного пара; определение параметров влажного насыщенного пара

Основные положения теории

Водяной пар является основным рабочим телом современной теплоэнергетики, используется во многих технологических процессах, применяется в качестве теплоносителя в теплообменных аппаратах систем отопления и вентиляции.

Пар, соприкасающийся с водой и находящийся в термодинамическом с ней равновесии, называется влажным насыщенным. Если в паре при температуре и давлении насыщения отсутствуют взвешенные капли жидкости, то он называется сухим насыщенным. Состояние насыщенного пара крайне неустойчиво: при сообщении ему теплоты в изобарном процессе происходит перегрев пара, а при отнятии — переход во влажный насыщенный пар. Характеристикой влажного насыщенного пара является степень сухости пара

$$x = \frac{m''}{m' + m''}, \quad (3.1)$$

где m' и m'' — массовая доля жидкости и сухого насыщенного пара во влажном насыщенном паре соответственно.

Все свойства воды и водяного пара, находящихся в состоянии насыщения на пограничной кривой, определяются по таблицам "Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения" (Приложения 7 и 8) по давлению p_n либо по температуре T_s (T_n).

Процесс получения пара при постоянном давлении включает в себя три этапа: 1) подогрев воды от начальной температуры T_0 до температуры кипения T_1 (изобара a_0b'); 2) собственно парообразование, т.е. превращение кипящей жидкости в сухой насыщенный пар (изобарно - изотермический процесс $b'c''$); 3) перегрев пара от T_n до необходимой температуры T (изобара $c''d$).

Для процесса парообразования $b'c''$ справедливо равенство

$$T_n \cdot (s'' - s') = h'' - h' = r, \quad (3.2)$$

где T_n – температура насыщения пара при давлении p_n , К;

s' и s'' – энтропия воды на линии насыщения и сухого насыщенного пара соответственно, кДж/(кг·К);

r – теплота парообразования – количество теплоты, необходимое для перевода 1 кг кипящей воды в сухой насыщенный пар в изобарном процессе, кДж/кг;

h' и h'' – энтальпия воды на линии насыщения и сухого насыщенного пара соответственно, кДж/кг.

В области влажного насыщенного пара на испарение тратится не вся теплота парообразования, а только ее часть e $s_x - s'$, $r \cdot x$. В этом случае уравнение (3.2) можно записать в виде

$$T_n \cdot (s_x - s') = r \cdot x = h_x - h'. \quad (3.3)$$

Решая (3.3) относительно h_x , получим

$$h_x = h' + r \cdot x. \quad (3.4)$$

В 1 кг влажного пара содержится x кг сухого пара и $(1 - x)$ кг воды. Энтальпия такой смеси равна

$$h_x = (1 - x) h' + x \cdot h''. \quad (3.5)$$

Удельный объем влажного насыщенного пара определяется по формуле

$$v_x = v'' x + (1 - x) v' \quad (3.6)$$

где v' и v'' – удельный объем кипящей воды и сухого насыщенного пара соответственно, $\text{м}^3/\text{кг}$.

При высоких степенях сухости ($x = 0,90 \dots 0,96$) величиной $(1 - x)$ можно пренебречь, так как $v'' \gg v'$. Тогда объем влажного пара можно считать равным

$$v_x = v'' x \quad (3.7)$$

Внутренняя энергия влажного насыщенного пара равна

$$u_x = h_x - p \cdot v_x \quad (3.8)$$

Удельная энтропия влажного насыщенного пара определяется из (3.3)

$$s_x = s' + \frac{r \cdot x}{T_H} \quad (3.9)$$

Процесс парообразования можно также представить в h - s диаграмме, впервые построенной Р. Молье. За начало отсчета принята тройная точка воды O (рис. 3.2), где $h = 0$, $s = 0$.

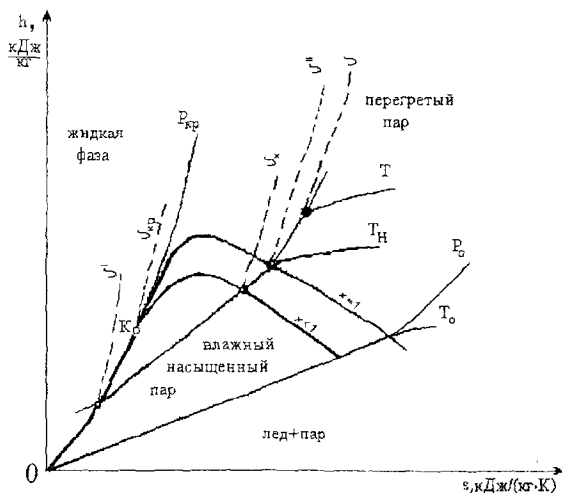


Рис. 3.2. h - s диаграмма воды и водяного пара

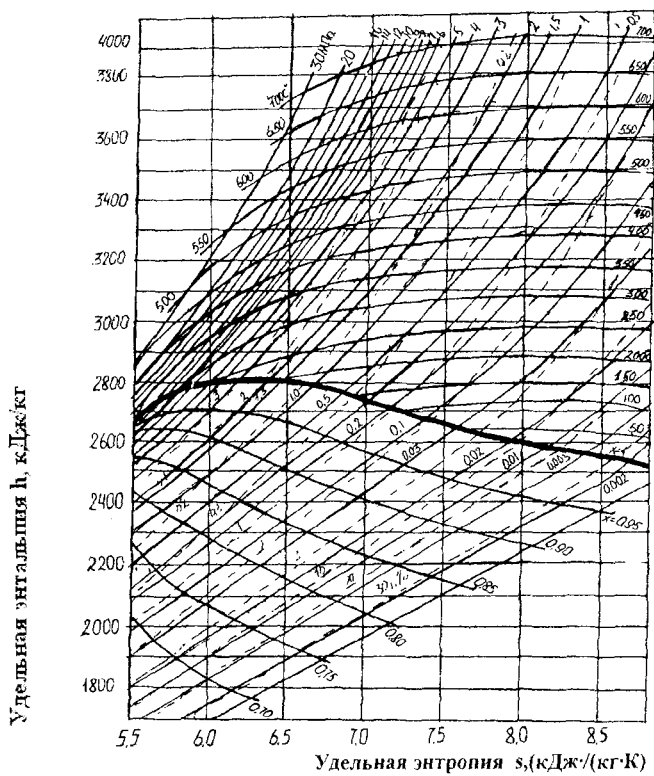


Рис. 3.3. h - s диаграмма водяного пара

Описание экспериментальной установки

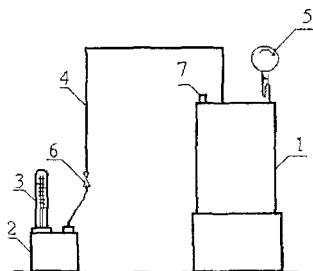


Рис. 3.4. Схема экспериментальной установки

Установка (рис. 3.4) состоит из парогенератора 1, калориметра 2, в крышке которого имеются отверстия для установки термометра 3 и подвода пара. Пар подается из парогенератора через паропровод 4. Давление пара измеряется манометром 5, расход пара регулируется вентилем 6. Парогенератор снабжен предохранительным клапаном 7.

Методика проведения эксперимента

В основу опытного определения степени сухости и энтальпии водяного пара принят метод конденсации, который заключается в следующем. В калориметр с водопроводной водой подается водяной пар, который при конденсации отдает воде теплоту в количестве

$$Q = M_1 \cdot (h_x - h_2) \quad (3.10)$$

где M_1 – масса пара (конденсата), кг;

h_x – удельная энтальпия влажного насыщенного пара, кДж/кг;

h_2 – удельная энтальпия конденсата, кДж/кг.

Величина h_x определяется из (3.4), а h_2 рассчитывается по формуле

$$h_2 = c_p \cdot t_2, \quad (3.11)$$

где c_p – удельная массовая изобарная теплоемкость воды, кДж/(кг·К);

t_2 – температура воды после конденсации пара, °С.

Количество теплоты, полученное водой, определяется по формуле

$$Q = M_o \cdot c_p \cdot (t_2 - t_1), \quad (3.12)$$

где M_o – масса воды до конденсации пара, кг;

t_1 – температура воды до конденсации пара, °С.

Приравнивая правые части уравнения (3.11) и (3.12)

$$M_1 \cdot (h_x - h_2) = M_o \cdot c_p \cdot (t_2 - t_1), \quad (3.13)$$

и подставив в (3.10) выражения (3.4), (3.11) и (3.13), получим

$$M_1 \cdot (h' + r \cdot x - c_p \cdot t_2) = M_o \cdot c_p \cdot (t_2 - t_1), \quad (3.14)$$

откуда степень сухости водяного пара

$$x = \frac{1}{r} \left[\frac{M_o \cdot c_p}{M_1} (t_2 - t_1) + c_p t_2 - h' \right]. \quad (3.15)$$

Методика определения энтальпии пара основана на том, что энтальпия пара до дросселирования и него остается постоянной.

Величина энтальпии пара при атмосферном давлении определяется методом калориметрирования. Если в некотором количестве воды, находящейся в калориметре, сконденсировать массу пара M_1 , то энтальпия смеси повысится. Так как этот процесс происходит при постоянном давлении, то разность энтальпий будет равна количеству теплоты, расходуемой в процессе смешения. Уравнение теплового баланса имеет вид (3.14).

Решая уравнение (3.14) относительно h_x , можно получить энтальпию влажного насыщенного пара

$$h_x = h_2 + c_p \cdot (t_2 - t_1) \cdot \frac{M_o}{M_1}. \quad (3.17)$$

Порядок проведения эксперимента таков. Определяется масса калориметра M_k , затем калориметр заполняется водой на 2/3 высоты и определяется его масса с водой M'_k . Измеряется давление пара p_m в парогенераторе, температура t_2 , масса калориметра с водой и конденсатом M''_k . Атмосферное давление p_b определяется барометром,

Результаты замеров сводятся в табл. 3.1.

Т а б л и ц а 3.1

Экспериментальные данные

№ п/п	Масса калориметра M_k , кг	Масса калориметра с водой M'_k , кг	Температура воды		Избыточное давление пара p_m в парогенераторе		Барометрическое давление p_b , МПа	Абсолютное давление p , МПа	Масса калориметра с водой и конденсатом M''_k , кг	Температура конденсата t_2 , °С
			t_1 , °С	T_1 , К	кгс/см ²	МПа				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Эксперимент требует соблюдения правил техники безопасности при работе с калориметром в момент подачи пара. Давление 0,15-0,16 МПа

соответствует температуре 109-113 °С. Попадание струи пара, имеющего такую температуру, на открытую поверхность кожи может привести к ожогу. Поэтому данную часть эксперимента следует проводить в присутствии лаборанта.

Обработка результатов эксперимента

Из таблиц «Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения» (Приложение 8) определяются h' , v' , δ' , $T_{\text{н}}$, g , v'' . Находятся масса воды в калориметре $M_0 = M'_k - M_k$ и масса конденсата $M_1 = M''_k - M'_k$. Затем по формулам (3.15) и (3.16) определяются степень сухости и энтальпия, а по (3.6), (3.0) и (3.9) – удельный объем, внутренняя энергия и энтропия влажного пара. Теплоемкость воды определяется из таблицы «Физические свойства воды на линии насыщения» по температуре (Приложение 6). Результаты обработки сводятся в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Результаты обработки экспериментальных данных

№ п/п	Масса воды M_0 , кг	Масса пара M_1 , кг	Энтальпия воды на линии насыщения, h' , кДж/кг	Удельный объем воды на линии насыщения v' , м ³ /кг	Удельная энтропия воды s' , кДж/(кг·К)	Температура насыщения воды $T_{\text{н}}$, К	Теплота фазового перехода g , кДж/кг	Удельный объем насыщенного пара v'' , м ³ /кг	Степень сухости x	Параметры исследуемого пара			
										Энтальпия h_x , кДж/кг	Удельный объем v_x , м ³ /кг	Внутренняя энергия u_x , кДж/кг	Энтропия s_x , кДж/(кг·К)
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													
13													
14													

По результатам расчета сделать анализ полученных данных и сформулировать выводы.

Контрольные вопросы

1. Какой пар называется влажным насыщенным, сухим насыщенным, перегретым?
2. Степень сухости водяного пара
3. Что называется теплотой парообразования?
4. Изобразите процесс парообразования в $p-v$ и $h-s$ -диаграммах.
5. Расчетные формулы основных термодинамических параметров влажного насыщенного пара.
6. Как изменяется энтальпия влажного насыщенного пара при уменьшении степени сухости?
7. Определите все параметры влажного насыщенного пара по давлению и степени сухости одного из опытов, используя $h-s$ -диаграмму.

Лабораторная работа № 4

Определение параметров влажного воздуха

Цель работы: закрепление теоретических сведений о влажном воздухе; определение основных параметров влажного воздуха с помощью психрометров Ассмана и Августа, а также $h-d$ диаграммы влажного воздуха.

Основные положения теории

Влажный воздух представляет собой смесь неконденсирующихся газов в составе сухого воздуха и водяного пара. Каждому значению температур воздуха соответствует некоторое максимальное содержание пара в единице объема, при котором пар становится сухим насыщенным, а воздух, его содержащий, – влажным насыщенным воздухом.

Охлаждение насыщенного воздуха сопровождается образованием тумана, т.е. снижением части пара, содержащегося в воздухе. При нагревании насыщенный воздух переходит в ненасыщенное состояние, а содержащийся в нем сухой насыщенный пар становится перегретым. Воздух, не содержащий водяного пара, называется сухим.

К смеси сухого воздуха и водяного пара применим закон Дальтона, согласно которому давление влажного воздуха равно сумме парциальных давлений сухого воздуха p_v и p_n

$$p = p_v + p_n. \quad (4.1)$$

Для количественной оценки состояния влажного воздуха применяют ряд величин. Одной из них является абсолютная влажность - количество водяного пара в 1 м^3 влажного воздуха. Абсолютная влажность воздуха численно равна плотности содержащегося в нем водяного пара ρ_n при парциальном давлении его в воздухе p_n и температуре воздуха t .

Отношение абсолютной влажности воздуха ρ_n к максимально возможной ρ_n при той же температуре и давлении называют относительной влажностью φ , выраженной в процентах или долях единицы

$$\varphi = \frac{\rho_n}{\rho_n} = \frac{p_n}{p_n}, \quad (4.2)$$

где p_n — парциальное давление водяного пара, Па;

ρ_n — максимально возможное парциальное давление водяного пара, определяется из таблиц насыщенного водяного пара по температуре (Приложения 8).

При неизменном парциальном давлении водяного пара с повышением температуры воздуха его относительная влажность уменьшается, с понижением температуры — увеличивается. При некоторой температуре, когда $p_n = p_n$, воздух достигает полного насыщения водяным паром. Эта температура называется температурой точки росы t_p . Если продолжить охлаждение воздуха ниже температуры точки росы, то парциальное давление пара, содержащегося в нем, будет понижаться соответственно давлению насыщения для заданной температуры и лишнее количество влаги будет конденсироваться.

Влагосодержание воздуха d представляет собой отношение массы водяного пара, содержащегося во влажном воздухе, к 1 кг содержащегося в нем сухого воздуха, взятых при соответствующих парциальных давлениях

$$d = \frac{M_n}{M_v} = \frac{p_n}{p_v} = \frac{\mu_n p_n}{\mu_v p_v} = 0,622 \frac{p_n}{p - p_n}, \quad \text{кг/кг с.в.}, \quad (4.3)$$

где μ_n – молекулярная масса водяного пара, $\mu_n = 18,016$ кг/моль;

μ_v – молекулярная масса сухого воздуха, $\mu_v = 28,95$ кг/моль.

Для воздуха в состоянии насыщения $\phi = 1$ и

$$d = 0,622 \frac{p_n}{p - p_n}, \quad (4.4)$$

Энтальпия h равна количеству теплоты, которое нужно затратить на нагрев 1 кг влажного воздуха от 0°C до данной температуры в изобарном процессе. Так же, как и влагосодержание, энтальпию влажного воздуха принято относить к 1 кг сухого воздуха. Рассматривая влажный воздух как смесь, его энтальпию можно представить в виде суммы энтальпий 1 кг сухого воздуха и d кг водяного пара

$$h = h_v + h_{11} \cdot d, \quad \text{кДж/кг с.в.} \quad (4.5)$$

При температурах и давлениях влажного воздуха, применяемых в сушильной технике, можно с достаточной точностью принять, что

$$h_v = c_{pв} \cdot t, \quad \text{кДж/кг}, \quad (4.6)$$

где $c_{pв}$ – теплоемкость сухого воздуха, $c_{pв} = 1,005$ кДж/(кг·К) (по Приложению 5).

Энтальпию водяного пара, который в общем случае находится в воздухе в перегретом состоянии, можно определить по формуле

$$h_n = 2490 + 1,97 \cdot t. \quad (4.7)$$

Наиболее удобно определять параметры влажного воздуха с помощью h - d – диаграммы, впервые предложенной в 1918 г. Л.К. Рамзиным. В настоящее время h - d – диаграмма применяется при расчетах систем вентиляции, кондиционирования, отопления, сушки.

При $\varphi = 100\%$ воздух влажный насыщенный, $p_n = p_n$ и $\rho_n = \rho_n$. Выше линии $\varphi = 100\%$ расположена область влажного ненасыщенного воздуха, $p_n < p_n$ и $\rho_n < \rho_n$. Ниже линии $\varphi = 100\%$ воздух перенасыщен влагой (область тумана), $p_n = p_n$ и $\rho_n > \rho_n$.

Если необходимо найти параметры влажного воздуха для других давлений (отличных от заданного атмосферного давления, для которого построена h-d диаграмма влажного воздуха), следует воспользоваться формулой

$$d = \frac{0,622}{(p/\varphi) \cdot (1/p_n) - 1} \quad (4.8)$$

Из формулы (4.8) видно, что любая кривая $\varphi = \text{const}$ на данной h-d диаграмме может быть использована для любых атмосферных давлений, однако значение относительной влажности окажется различным и определяется отношением p/φ ,

Описание экспериментальной установки

При проведении данной работы используются два психрометра Августа и Ассмана (см. раздел "Измерение влажности воздуха"), психрометрические таблицы для этих психрометров, h-d - диаграмма влажного воздуха.

Методика проведения эксперимента

Психрометр устанавливают на то место, где необходимо определить параметры воздуха.

Перед началом опыта ткань одного из ртутных шариков психрометра Ассмана с помощью пипетки увлажняется водопроводной водой. Приводится в движение двигатель вентилятора, вмонтированный в корпус психрометра. Таким образом, поверхность психрометров омывается принудительными конвективными потоками воздуха со скоростью 2,5...3,0 м/с. Испарение воды с поверхности влажной ткани приведет к охлаждению мокрого термометра. По прошествии 4...5 минут снимаются показания сухого и мокрого термометров. Опытами установлено, что такое время необходимо для наступления адиабатического насыщения влажного воздуха над поверхностью влажной ткани.

Перед каждым повторным пуском психрометра Ассмана необходимо убедиться, что ткань на мокром термометре находится во влажном состоянии.

При работе с психрометром Августа следует постоянно проверять наличие достаточного количества воды в резервуаре для смачивания ткани на мокром термометре.

Разность показаний термометров $t_c - t_m$ называется психрометрической разностью. Следует отметить, что температура t_m вследствие теплопередачи к термометру извне не равна истинной температуре мокрого термометра, несмотря на создаваемую вентилятором скорость обдувания ртутных шариков термометров и имеющиеся заградительные кожухи. У психрометра Августа, из-за отсутствия вентилятора и отполированных защитных кожухов, погрешность определения t_m увеличивается.

Несмотря на вышеизложенное, показания психрометра дают возможность достаточно быстро и точно по специальным психрометрическим таблицам определить относительную влажность воздуха φ (Приложение 9 и 10).

Используя $h-d$ - диаграмму влажного воздуха, определяются относительная влажность φ , влагосодержание d , энтальпия h , парциальное давление пара p_n и давление насыщения p_n при данной температуре t_c , температура точки росы t_{pA} . Искомая точка находится по $h-d$ диаграмме (рис. 4.2).

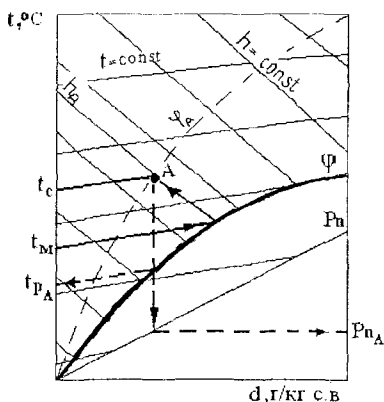


Рис. 4.2. Определение положения т. А по температурам мокрого t_m и сухого термометров t_c

Полученные данные заносим в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Экспериментальные данные

№ п/п	Наименование помещения	Место снятия показаний	Показания термометров по психрометру Ассмана, °С		φ _т по психрометрическим таблицам, %	Показания термометров по психрометру Августа, °С		φ _т по психрометрическим таблицам, %
			t _с	t _м		t _с	t _м	
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Обработка результатов эксперимента

По средним значениям сухого и мокрого термометров определяется относительная влажность воздуха. Для этого используются соответствующие психрометрические таблицы (Приложение 9 и 10). Например, термометры психрометра Августа показали, что t_м = 15 °С, а t_с = 19,5 °С. Из Приложения 9 находим, что при t_м = 15 °С и t_м - t_с = 4,5 °С относительная влажность воздуха будет равна φ_т = 59 %, Результаты заносим в табл. 4.1.

По h-d диаграмме (рис. 4.2 и 4.3) определяются следующие величины: относительная влажность φ, энтальпия h, влагосодержание d, парциальное давление пара p_п, давление насыщения p_н, температура точки росы t_р. Полученные данные заносятся в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Результаты обработки экспериментальных данных

№ п/п	Наименование помещения	Температура воздуха t _с , °С	Относительная влажность φ, %	Энтальпия h, кДж/кг	Влагосодержание d, г/кг с.в.	Парциальное давление пара p _п , Па	Давление насыщения p _н , Па	Температура точки росы t _р , °С	Примечание
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

По результатам табл. 4.1 и 4.2 сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Какой воздух называется влажным ненасыщенным, насыщенным?
2. Что представляет собой область тумана?
3. Что называется абсолютной и относительной влажностью воздуха?
4. Какими приборами пользуются для определения влажности воздуха?
5. Преимущества аспирационного психрометра Ассмана по сравнению с психрометром Августа.
6. Что называется психрометрической разностью температур? От чего зависит её величина?
7. Какую температуру называют точкой росы?
8. Что называется влагосодержанием воздуха? Формула расчета влагосодержания.
9. Чему равна энтальпия влажного воздуха?
10. Принцип построения $h-d$ диаграммы
11. Как находятся основные параметры влажного воздуха по $h-d$ диаграмме?

Лабораторная работа № 5

Исследование процесса конденсации водяного пара во влажном воздухе

Ц е л ь р а б о т ы : закрепление теоретических сведений о влажном воздухе, изучение процесса конденсации водяного пара во влажном воздухе, определение с помощью аналитических зависимостей количества влаги в конденсаторе и потерь теплоты калорифером

В процессе сушки влажных материалов в качестве рабочего тела часто используется влажный воздух, предварительно нагреваемый в калорифере. Процесс изобарного нагрева воздуха в калорифере протекает при постоянном парциальном давлении и влагосодержании; в $h - d$ – диаграмме изображается вертикальной линией 1-2 (рис. 5.1). Теплота процесса 1-2 (нагревание влажного воздуха, содержащего m кг сухого воздуха) равна

$$Q = m \cdot (h_2 - h_1). \quad (5.1)$$

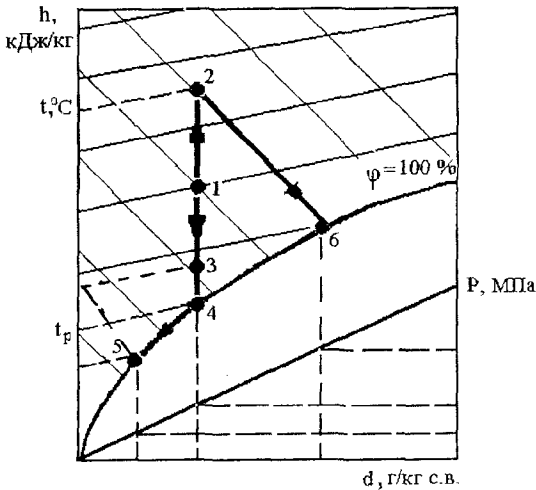


Рис. 5.1. Изображение процессов во влажном воздухе в h - d диаграмме

Процесс охлаждения воздуха проходит также при постоянных p_n и d по линии 1-3. Теплота охлаждения влажного воздуха, содержащего m кг сухого воздуха (процесс 1-3) определяется выражением

$$Q = m \cdot (h_1 - h_3). \quad (5.2)$$

Постоянство влагосодержания в процессе охлаждения будет при условии $t_c < t_p$, т.е. при охлаждении ненасыщенного влажного воздуха.

В т.4 ненасыщенный воздух становится насыщенным ($t_c = t_p$), а перегретый пар, содержащийся во влажном воздухе, – сухим насыщенным паром. При дальнейшем охлаждении воздуха происходит конденсация водяного пара (линия 4-5), которая приводит к уменьшению влагосодержания ($d_5 < d_4$).

Количество отводимой теплоты составит

$$Q = m \cdot (h_4 - h_5). \quad (5.3)$$

Количество выпавшей в процессе конденсации влаги определяется выражением

$$\Delta M = (d_4 - d_5) \cdot m . \quad (5.4)$$

Общее количество теплоты процесса 1-5 равно

$$Q = m \cdot (h_1 - h_5) . \quad (5.5)$$

При условии, что удельная энтальпия воды равна нулю, процесс испарения воды можно считать происходящим при постоянной энтальпии влажного воздуха (линия 2-6), т.к. теплота воздуха, затраченная на испарение воды, возвратится в воздух вместе с испаренной влагой.

Количество испаренной влаги определяется выражением

$$\Delta M = (d_6 - d_2) \cdot m . \quad (5.6)$$

Описание экспериментальной установки

Установка состоит из герметичного сосуда 2, сообщающегося через трубопровод и вентиль 16 с водопроводной сетью, а через трубопроводы 3 и 13 – с конденсатором 1 и калорифером 4 (рис. 5.2).

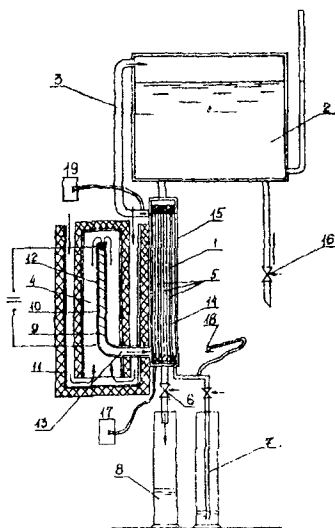


Рис. 5.2. Схема калориферной установки

Калорифер включает теплоизолированный кожух 11, в котором размещен цилиндр 9 с электрическим нагревателем 10. Воздух проходит по кольцу зазора между кожухом и трубой 9, затем поднимается вверх, омывая нагреватель, и через патрубок 13 поступает в межтрубное пространство конденсатора.

Конденсатор состоит из пучка трубок 5, по которым циркулирует водопроводная вода. Трубки находятся в кожухе 15, сообщаемом посредством трубопровода 3 с воздушным пространством сосуда 2.

Расход воздуха измеряется по количеству воды, поступающей в сосуд 8, а количество конденсата – с помощью сосуда 7.

Температура на входе и выходе из калорифера, за конденсатором измеряется с помощью термопар в комплекте с потенциометром, относительная влажность – психрометром Ассмана.

Методика проведения эксперимента

Перед началом опыта поверхности трубок 5 охлаждаются водопроводной водой путем её истечения из сосуда 2 при открытых вентилях 16 и 6.

Затем, регулируя вентилем 6 (вентиль 16 закрыт) истечение воды из сосуда 2, следует добиться стационарности потока воздуха, проходящего через калорифер и конденсатор, что контролируется постоянством разрежения в сосуде 2 с помощью микроманометра 18.

Относительная влажность воздуха на входе в калорифер определяется с помощью психрометра Ассмана. Одновременно снимаются показания сухого и мокрого термометров на выходе из калорифера и конденсатора с помощью термопар 17,19 и потенциометра.

При достижении стационарного режима следует начинать измерения всех параметров процесса. В течение опыта, продолжительность которого 20 минут, через каждые 4 минуты записываются в таблицу наблюдений расход воздуха, электрическая мощность нагревателя, показания термопар.

Результаты наблюдений сводятся в табл. 5.1

Экспериментальные данные

№ п/п	Мощность нагревателя W, Вт	Температура воздуха на входе в калорифер		Расход воздуха V, м ³ /ч	Барометрическое давление p _б , мм рт.ст.	Температура воздуха за калорифером		Температура воздуха за конденсатором	
		сухого t ₁ ^с , °С	мокрого t ₁ ^м , °С			сухого t ₂ ^с , °С	мокрого t ₂ ^м , °С	сухого t ₃ ^с , °С	мокрого t ₃ ^м , °С
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Обработка результатов эксперимента

Массовый расход сухого воздуха M_в, проходящего через установку, определяется по формуле

$$M_g = \frac{133,3 \cdot p_g \cdot V}{R_g \cdot T_1^c}, \text{ кг/ч} \quad (5.7)$$

где p_в – парциальное давление сухого воздуха на входе в установку, мм рт. ст.,

$$p_v = p_b - p_m;$$

p_б – барометрическое давление, мм рт. ст.;

p_п – парциальное давление воды в воздухе на входе в калорифер, мм рт. ст.;

V – расход воздуха, м³/ч;

R_в – газовая постоянная сухого воздуха, R_в = 287 кДж/(кг·К);

T₁^с – температура воздуха на входе в установку, К.

По показаниям сухого и мокрого термометров, используя формулы (4.2)...(4.7) лабораторная работа №4), определяют φ, d, h на входе и выходе из калорифера и за конденсатором.

Количество теплоты за единицу времени Q, подведенное к сухому воздуху при нагревании его в калорифере, определяется выражением

$$Q^k = \frac{M_a \cdot (h_1 - h_2)}{3600}, \text{ кВт}, \quad (5.8)$$

где h_1 и h_2 – энтальпия воздуха на входе и выходе из калорифера соответственно, кДж/кг.

Потери теплоты в единицу времени в калорифере Q_{nom}^k (кВт) определяются как разность теплоты W , выделенной в электронагревателе, и теплоты Q , подведенной к воздуху в калорифере

$$Q_{nom}^k = W - Q. \quad (5.9)$$

Количество влаги в конденсаторе рассчитывается по формуле

$$M = (d_3 - d_2) \cdot M_a, \quad (5.10)$$

где d_2 и d_3 – влагосодержание воздуха до и после конденсатора соответственно, кг/кг с.в.

Результаты расчета сводятся в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Результаты обработки экспериментальных данных

№ п/ п	Параметры воздуха									Массовый расход сухого воздуха M_a , кг/ч	Количество теплоты, подводимой в калорифер Q^k , кВт	Потери теплоты в калорифере $Q_{пот}$, кВт	Количество влаги в калорифере M , кг/ч
	на входе в калорифер			на выходе из калорифера			за конденса- тором						
	φ_1 , %	d_1 г кгс.в	h_1 кДж кг	φ_2 , %	d_2 г кгс.в	h_2 кДж кг	φ_3 , %	d_3 г кгс.в	h_3 кДж кг				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

По результатам расчета сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Изображение процессов нагрева и охлаждения влажного воздуха в $h - d$ диаграмме.
2. Как рассчитать количество теплоты процессов нагрева и охлаждения воздуха ?
3. Изображение процесса конденсации влаги в $h - d$ диаграмме.
4. Как определить количество отводимой теплоты при конденсации влаги?
5. Как рассчитать количество сконденсированной влаги?
6. Процесс испарения влаги в $h - d$ диаграмме.
7. Почему процесс испарения влаги осуществляется при $h = \text{const}$?
8. Как рассчитать количество испарившейся влаги?

Список использованных источников

1. Преображенский, В.П. Теплотехнические измерения и приборы. – М.: Энергия, 1978.
2. Иванова, Г.М., Кузнецов, Н.Д., Чистяков, В.С. Теплотехнические измерения и приборы. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
3. Лабораторный практикум по общей теплотехнике и строительной физике. В 2 ч. Ч. 1. Теория инженерного эксперимента и теплофизические измерения. – Мн., 1976.
4. Теория и техника теплофизического эксперимента: учебное пособие для вузов/Под ред. В.К. Шукина. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
5. Хрусталева, Б.М. Техническая термодинамика. – Мн.: БГПА, 2001.
6. Техническая термодинамика/Под ред. В.И. Крутова. – М.: Высшая школа, 1991.
7. Ривкин, С.Л., Александров, А.А. Теплофизические свойства воды и водяного пара. – М.: Энергия, 1980.
8. Лабораторные работы по технической термодинамике для студентов специальности Т.19.05.00 «Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна». – Мн.: БГПА, 2001.

Приложение 1

Некоторые основные и производные единицы

Величина	Единица измерения	Сокращенное обозначение единиц
Длина	метр	м
Масса	килограмм	кг
Время	секунда	с
Сила электрического тока	ампер	А
Термодинамическая температура	кельвин	К
Количество вещества	моль	моль
Площадь	квадратный метр	м ²
Объем, вместимость	кубический метр	м ³
Скорость	метр в секунду	м/с
Сила	ньютон	Н (кг·м/с ²)
Давление	паскаль	Па (Н/м ²)
Плотность	килограмм на кубический метр	кг/м ³
Удельный объем	кубический метр на килограмм	м ³ /кг
Энергия, работа, количество теплоты, энтальпия	джоуль	Дж (Н·м)
Мощность, поток энергии	ватт	Вт (Дж/с)
Энтропия	джоуль на кельвин	Дж/К
Удельная массовая теплоемкость	джоуль на килограмм-кельвин	Дж/(кг·К)
Теплота фазового превращения	джоуль на килограмм	Дж/кг

Приложение 2

Множители и приставки для образования кратных и дольных единиц

Кратные единицы				Дольные единицы			
Множитель	Приставка	Обозначение		Множитель	Приставка	Обозначение	
		русское	международное			русское	международное
10 ¹²	тера	Т	T	10 ⁻¹	деци	д	d
10 ⁹	гига	Г	G	10 ⁻²	санти	с	c
10 ⁶	мега	М	M	10 ⁻³	милли	м	m
10 ³	кило	к	K	10 ⁻⁶	микро	мк	μ
10 ²	гекто	г	h	10 ⁻⁹	нано	н	n
10	дека	да	da	10 ⁻¹²	пико	п	p

**Молярные массы, плотности киломолей при нормальных условиях, критические параметры
и газовые постоянные некоторых идеальных газов**

Газ	Химическое обозначение	Молярная масса, кг/кмоль	Плотность, кг/м ³	Критические параметры			Газовая постоянная, Дж/(кг·К)
				температура, °С	давление, МПа	объем, м ³ /кг	
Воздух	—	28,970	1,2928	-140,60	3,769	0,003196	287,0
Кислород	O ₂	31,997	1,4289	-118,38	5,087	0,002460	259,8
Азот	N ₂	28,013	1,2505	-146,9	3,396	0,003835	296,8
Гелий	He	4,003	0,1785	-267,95	0,226	0,014330	2078,0
Аргон	Ar	39,944	1,7839	-122,50	4,858	0,001876	208,2
Водород	H ₂	2,016	0,0899	-239,90	1,257	0,032258	4124,0
Оксид углерода	CO	28,009	1,2500	-140,00	3,496	0,003322	296,8
Диоксид углерода	CO ₂	44,008	1,9768	31,05	7,383	0,002137	188,9
Диоксид серы	SO ₂	64,066	2,9263	157,50	8,147	0,001904	129,8
Метан	CH ₄	16,032	0,7170	-82,50	4,641	0,006170	518,8
Этилен	C ₂ H ₄	28,052	1,2510	9,90	5,097	0,004740	296,6
Аммиак	NH ₃	17,036	0,7714	132,40	11,298	0,004255	488,3
Вода (пар)	H ₂ O	18,014	(0,804)	374,12	22,115	0,003147	(461)

Соотношение между единицами измерения давления

Наименование единиц	Па	бар	мм вод.ст.	мм рт.ст.	кгс/см ²
1 Паскаль	1	10^{-5}	0,102	$7,5024 \cdot 10^{-3}$	$1,02 \cdot 10^{-5}$
1 бар	10^5	1	$1,02 \cdot 10^4$	$7,5024 \cdot 10^2$	1,02
1 миллиметр водяного столба	9,8067	$9,8067 \cdot 10^{-5}$	1	$7,35 \cdot 10^{-2}$	10^{-4}
1 миллиметр ртутного столба	$1,33 \cdot 10^2$	$1,33 \cdot 10^{-3}$	13,6	1	$1,36 \cdot 10^{-3}$
1 килограмм-сила на квадратный сантиметр	$9,8057 \cdot 10^4$	0,98057	10^4	$7,35 \cdot 10^2$	1

Таблица истинных и средних теплоемкостей идеальных газов в кДж/(кмоль·К)

t, °C	Воздух				Кислород			
	$c_{p\mu}$	$c_{v\mu}$	$\overline{c_{p\mu}}^t$	$\overline{c_{v\mu}}^t$	$c_{p\mu}$	$c_{v\mu}$	$\overline{c_{p\mu}}^t$	$\overline{c_{v\mu}}^t$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	29,073	20,759	29,073	20,758	29,274	20,959	29,274	20,959
100	29,266	20,951	29,153	20,838	29,877	21,562	29,538	21,223
200	29,676	21,361	29,299	20,984	30,815	22,500	29,931	21,616
300	30,266	21,951	29,521	21,206	31,832	23,517	30,400	21,667
400	30,949	22,634	29,789	21,474	32,758	24,443	30,878	22,563
500	31,640	23,325	30,095	21,780	33,549	25,234	31,334	23,019
600	32,301	23,986	30,405	22,090	34,202	25,887	31,761	23,446
700	32,900	24,585	30,723	22,408	34,746	26,431	32,150	23,835
800	33,442	25,117	31,028	22,713	35,203	26,888	32,505	24,187
900	33,905	25,590	31,321	23,007	35,584	27,259	32,825	24,510
1000	34,315	26,000	31,598	23,283	35,914	27,599	33,118	24,803
1200	35,002	26,687	32,109	23,794	36,488	27684	33,633	25,318
1400	35,546	27,231	32,565	24,250	36,999	28,173	34,076	25,761
1600	35,977	27,662	32,967	24,652	37,480	29,165	34,474	26,159
1800	36,346	28,031	33,319	25,004	37,945	29,630	34,834	26,519
2000	36,655	28,340	33,641	25,326	38,406	30,093	35,169	26,854
2200	36,928	28,613	33,926	25,611	38,858	30,543	35,483	27,168
2400	37,170	28,855	34,185	25,870	39,293	30,978	35,785	27,470
0	29,115	20,800	29,115	20,800	28,617	20,302	28,617	20,302
100	29,199	20,884	29,144	20,829	29,128	20,813	28,935	20,620
200	29,471	21,156	29,288	20,913	29,241	20,926	29,073	20,578

Продолжение приложения 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9
300	29,952	21,637	29,383	21,068	29,299	20,984	29,125	20,808
400	30,576	22,261	29,601	21,286	29,396	21,081	29,186	20,871
500	31,250	22,935	29,684	21,549	29,559	21,244	29,249	20,934
600	31,920	23,605	30,149	21,834	29,793	21,478	29,316	21,001
700	32,540	24,225	30,451	22,136	30,099	21,784	29,408	21,093
800	33,101	24,785	30,748	22,433	30,472	22,157	29,517	21,202
900	33,599	25,284	31,037	22,722	30,869	22,544	29,647	21,332
1000	34,039	25,724	31,313	22,998	31,284	22,969	29,789	21,474
1200	34,763	26,448	31,828	23,513	31,155	23,840	30,107	21,792
1400	35,320	27,005	32,293	23,978	33,000	24,685	30,467	22,152
1600	35,747	27,432	32,699	24,384	33,762	25,447	30,832	22,517
1800	36,090	27,775	33,055	24,740	34,445	26,130	31,192	22,877
2000	36,377	28,052	33,373	25,058	35,056	26,741	31,548	23,233
2200	36,603	28,278	33,658	25,343	35,605	27,290	31,891	23,576
2400	36,795	28,470	33,909	25,594	36,090	27,775	32,222	23,907
t, °C	Водяной пар				Оксид углерода			
0	33,499	25,184	33,499	25,184	29,123	20,808	29,123	20,808
100	34,055	25,740	33,741	25,426	29,262	20,947	29,178	20,863
200	34,964	26,649	34,118	25,803	29,647	21,332	29,303	20,988
300	36,036	27,721	34,575	26,620	30,254	21,939	29,517	21,202
400	37,191	28,876	35,090	26,775	30,974	22,659	29,789	21,474
500	38,406	30,091	35,630	27,315	31,707	23,393	30,099	21,784
600	39,622	31,347	36,195	27,880	32,402	24,087	30,426	22,111
700	40,951	32,636	36,789	28,474	33,026	24,711	30,752	22,437
800	42,249	33,934	37,392	29,077	33,574	25,259	31,070	22,755
900	43,513	35,198	38,008	29,693	34,055	25,740	31,376	23,061

1	2	3	4	5	6	7	8	9
1000	44,723	36,408	38,619	30,304	34,470	26,155	31,665	23,350
1200	46,913	38,598	39,825	31,510	35,140	26,825	32,192	23,877
1400	48,801	40,486	40,976	32,661	35,646	27,331	32,653	24,338
1600	50,409	42,094	42,056	33,741	36,040	27,725	33,051	24,736
1800	51,782	43,467	43,070	34,755	36,350	28,035	33,402	25,087
2000	52,930	44,615	43,995	35,680	35,597	28,282	33,708	25,393
2200	53,930	45,615	44,853	36,538	36,802	28,487	33,980	25,665
2400	54,780	46,465	45,645	37,330	36,978	28,663	34,223	25,908
	Углекислый газ				Метан			
0	35,860	27,545	35,860	27,545	34,739	26,423	34,738	26,423
100	40,206	31,891	38,112	29,797	39,281	30,966	36,806	28,491
200	43,689	35,374	40,059	31,744	45,029	36,174	39,427	31,112
300	46,515	38,200	41,755	33,440	50,941	42,626	42,274	33,959
400	48,860	40,515	43,250	34,935	56,622	48,307	45,180	36,865
500	50,815	42,500	44,574	36,258	61,856	53,541	47,977	39,662
600	52,452	44,137	45,753	37,438	66,621	58,305	50,673	42,358
700	53,826	45,511	46,814	38,498	70,929	62,614	53,277	44,962
800	54,977	46,662	47,763	39,448	74,747	66,432	55,902	47,587
900	55,952	47,637	48,617	40,302	78,168	69,853	58,331	50,016
1000	56,776	48,458	49,392	41,077	81,195	72,880	60,503	52,189
1200	57,071	49,756	50,740	42,425	83,845	75,530	62,455	54,140
1400	58,030	50,715	51,858	43,543	86,106	77,791	64,175	55,860
1600	59,737	51,422	52,800	44,485	—	—	—	—
1800	60,269	51,954	53,604	45,289	—	—	—	—
2000	60,654	52,339	54,290	45,975	—	—	—	—
2200	60,918	52,603	54,881	46,566	—	—	—	—

Приложение 6

Физические свойства воды на линии насыщения

t, °C	P _н , МПа	ρ, кг/м ³	λ, Вт/(м·К)	C _p , кДж/(кг·К)	h', кДж/кг	α·10 ⁷ , м ² /с	v·10 ⁶ , м ² /с	β·10 ⁴ , 1/К	Pr
0	0,10132	999,9	0,560	4,210	0,00061	1,31	1,789	0,63	13,60
10	0,10132	999,7	0,580	4,204	42,0364	1,38	1,306	0,70	9,52
20	0,10132	998,2	0,597	4,195	83,9034	1,43	1,006	1,82	7,02
30	0,10132	995,7	0,612	4,190	125,706	1,47	0,805	3,21	5,45
40	0,10132	992,2	0,627	4,187	167,495	1,51	0,659	3,87	4,36
50	0,10132	988,1	0,640	4,186	209,296	1,55	0,556	4,49	3,59
60	0,10132	983,2	0,650	4,185	251,129	1,58	0,478	5,11	3,03
70	0,10132	977,2	0,662	4,186	293,009	1,61	0,415	5,70	2,58
80	0,10132	971,8	0,669	4,187	334,952	1,63	0,365	6,32	2,23
90	0,10132	965,3	0,676	4,189	376,977	1,65	0,326	6,25	1,95
100	0,10132	958,4	0,684	4,191	419,105	1,68	0,295	7,52	1,75
110	0,14326	951,0	0,685	4,194	461,360	1,70	0,272	8,08	1,60
120	0,19854	943,1	0,686	4,190	503,760	1,71	0,252	8,64	1,47
130	0,20711	934,8	0,686	4,203	546,350	1,73	0,233	9,19	1,35
140	0,36136	926,1	0,685	4,208	589,150	1,72	0,217	9,72	1,26
150	0,45970	917,0	0,684	4,214	632,19	1,73	0,203	10,30	1,17
160	0,61894	907,4	0,681	4,222	675,510	1,72	0,191	10,70	1,10
170	0,79203	897,3	0,676	4,230	719,15	1,72	0,181	11,30	1,05
180	1,00270	886,0	0,672	4,240	763,150	1,72	0,173	11,90	1,03
190	1,25520	876,0	0,664	4,250	807,550	1,71	0,165	12,60	0,965
200	1,55500	863,0	0,658	4,262	852,410	1,70	0,158	13,30	0,932

**Термодинамические свойства воды и водяного пара
в состоянии насыщения (по температуре)**

$t_{\text{н}}, ^\circ\text{C}$	$P_{\text{н}}, \text{МПа}$	$v', \text{м}^3/\text{кг}$	$v'', \text{м}^3/\text{кг}$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$h', \text{кДж}/\text{кг}$	$h'', \text{кДж}/\text{кг}$	$g, \text{кДж}/\text{кг}$	$s', \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$	$s'', \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,0006108	0,0010002	206,3	0,004847	0,00	2500,8	2500,8	0,	9,1544
5	0,0008718	0,0010001	147,2	0,006793	21,06	2510,0	2489,0	0,0762	9,0242
10	0,0012271	0,0010004	106,42	0,009398	42,04	2519,2	2477,3	0,1511	8,8995
15	0,0017040	0,0010010	77,97	0,012820	62,97	2528,4	2465,4	0,2244	8,7806
20	0,0023370	0,0010018	57,84	0,0172900	83,90	2537,2	2453,4	0,2964	8,6663
25	0,0031670	0,0010039	43,40	0,023040	104,80	2546,4	2441,7	0,3672	8,5570
30	0,0042410	0,0010044	32,93	0,030360	125,69	2555,6	2430,0	0,4367	8,4523
35	0,0056220	0,0010060	25,25	0,039600	146,58	2564,8	2418,3	0,5049	8,3518
40	0,0073750	0,0010079	19,55	0,051150	167,51	2573,6	2406,1	0,5723	8,2560
45	0,0095820	0,0010099	15,28	0,065450	188,41	2582,4	2394,0	0,6385	8,1638
50	0,0123350	0,0010121	12,05	0,083020	209,30	2591,6	2382,3	0,7038	8,0751
55	0,0157410	0,0010145	9,758	0,104400	230,19	2600,4	2370,1	0,7679	7,9901
60	0,0199200	0,0010171	7,678	0,130200	251,12	2609,2	2358,0	0,8311	7,9084
65	0,0250100	0,0010199	6,201	0,161300	272,06	2617,6	2345,4	0,8935	7,8297
70	0,0311600	0,0010228	5,045	0,198200	292,99	2626,4	2333,3	0,9550	7,7544
80	0,04736	0,0010290	3,409	0,2933	334,94	2643,1	2308,2	1,0752	7,6116
90	0,07011	0,0010359	2,361	0,4235	376,98	2659,5	2282,5	1,1924	7,4785

Продолжение приложения 7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
100	0,10132	0,0010435	1,673	0,5977	419,10	2675,8	2256,7	1,3071	7,3545
110	0,14327	0,0010515	1,210	0,8263	461,34	2691,3	2230,0	1,4185	7,2386
115									
120	0,19845	0,0010603	0,89917	1,122	503,7	2706,3	2202,7	1,5278	7,1289
130	0,27011	0,0010697	0,6683	1,496	546,4	2720,6	2174,2	1,6345	7,0271
140	0,3614	0,0010798	0,5087	1,966	589,1	2734,0	2144,9	1,7392	6,9304
150	0,4760	0,0010906	0,3926	2,547	632,2	2746,5	2114,3	1,8418	6,8383
160	0,6180	0,0011021	0,3068	3,629	675,3	2757,8	2082,5	1,9427	6,7508
165									
170	0,7920	0,0011144	0,2426	4,122	719,3	2768,7	2049,4	2,0419	6,6666
175									
180	1,0027	0,0011275	0,1939	5,157	763,3	2778,4	2015,1	2,1395	6,5858
185									
190	1,2553	0,0011415	0,1564	6,395	807,6	2786,3	1978,7	2,2358	6,5057
195									
200	1,5550	0,0011565	0,1272	7,863	852,4	2793,4	1940,6	2,3308	6,4318
210	1,9080	0,0011726	0,1044	9,578	897,6	2798,0	1900,4	2,4246	6,3577
220	2,3202	0,0011900	0,8606	11,62	943,7	2801,4	1857,7	2,5179	6,2848

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
230	2,7979	0,0012087	0,07147	13,99	990,2	2803,1	1812,9	2,6101	6,2132
240	3,3480	0,0012291	0,05967	16,76	1037,5	2803,1	1765,6	2,7022	6,1425
250	3,978	0,0012512	0,05005	19,98	1086,1	2801,0	1714,9	2,7934	6,0721
260	4,694	0,0012755	0,04215	23,72	1135,0	2796,4	1661,3	2,8851	6,0014
270	5,505	0,0013023	0,03560	28,09	1185,3	2789,7	1604,4	2,9764	5,9298
280	6,419	0,0013321	0,03013	33,19	1236,8	2779,6	1542,8	3,0685	5,8573
290	7,445	0,0013655	0,02553	39,17	1290,0	2766,2	1476,3	3,1610	5,7049
300	8,592	0,0014036	0,02164	46,21	1344,8	2749,1	1404,3	3,2548	5,7049

Приложение 8

**Термодинамические свойства воды и водяного пара
в состоянии насыщения (по давлению)**

P_n , МПа	t_n , °С	v' , м ³ /кг	v'' , м ³ /кг	ρ , кг/м ³	h' , кДж/кг	h'' , кДж/кг	g , кДж/кг	ζ' , кДж/(кг·К)	ζ'' , кДж/(кг·К)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,0010	6,93	0,0010001	130,04	0,00769	29,18	2513,4	2484,2	0,1053	8,9749
0,0020	17,486	0,0010014	67,24	0,01487	73,40	2533,1	2459,7	0,2603	8,7227
0,0025	21,071	0,0010021	54,42	0,01838	88,36	2539,5	2451,1	0,3119	8,6424
0,0030	24,078	0,0010028	45,77	0,02185	100,93	2545,3	2444,4	0,3547	8,5784
0,0040	29,95	0,0010042	34,93	0,02863	121,33	2553,7	2432,3	0,4225	8,4737
0,0050	32,89	0,0010054	28,24	0,03541	137,79	2560,9	2423,1	0,4764	8,3943
0,0060	36,17	0,0010065	23,77	0,04208	151,49	2567,1	2415,6	0,5209	8,3297
0,0070	41,53	0,0010085	18,13	0,05516	173,89	2576,4	2402,5	0,5919	8,2263

Продолжение приложения 8

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,010	45,82	0,0010102	14,70	0,06805	191,84	2583,9	2392,1	0,6496	8,1494
0,014	52,57	0,0010132	10,69	0,09353	220,05	2596,1	2376,0	0,7368	8,0305
0,018	57,82	0,0010159	8,448	0,1184	242,03	2605,4	2363,3	0,8040	7,9445
0,020	60,08	0,0010171	7,652	0,1307	251,48	2609,2	2357,7	0,8324	7,9075
0,025	64,99	0,0010198	6,201	0,1613	272,03	2617,6	2345,5	0,8934	7,8300
0,030	69,12	0,0010223	5,232	0,1911	289,30	2624,6	2335,3	0,9441	7,7673
0,040	75,87	0,0010264	3,999	0,2501	317,62	2636,3	2318,7	1,0261	7,6710
0,050	81,33	0,0010299	3,243	0,3083	340,53	2645,2	2304,7	1,0912	7,5923
0,060	85,94	0,0010330	2,734	0,3658	359,90	2653,1	2293,2	1,1453	7,5313
0,080	93,50	0,0010385	2,089	0,4787	391,75	2665,3	2273,5	1,2331	7,4342
0,090	96,72	0,0010409	1,869	0,5350	405,30	2670	2265	1,2696	7,
0,100	99,64	0,0010432	1,694	0,5903	417,4	3675	2258	1,3026	7,30
0,110	102,32	0,0010452	1,550	0,6453	428,9	2679	2250	1,3327	7,32
0,12	104,81	0,0010472	1,429	0,6999	439,4	2683	2244	1,3606	7,298
0,13	107,14	0,0010492	1,325	0,7545	449,2	2687	2238	1,3866	7,271
0,14	109,33	0,0010510	1,236	0,8088	458,5	2690	2232	1,4109	7,246
0,15	111,38	0,0010527	1,159	0,8527	467,2	2693	2226	1,4336	7,223
0,16	113,32	0,0010543	1,091	0,9164	475,4	2696	2221	1,4550	7,202
0,17	115,17	0,0010559	1,031	0,9699	483,2	2699	2216	1,4752	7,182
0,18	116,94	0,0010575	0,9773	1,023	490,7	2702	2211	1,4943	7,163
0,19	118,62	0,0010591	0,9290	1,076	497,9	2704	2206	1,5126	7,145
0,20	120,23	0,0010605	0,8854	1,129	504,8	2707	2202	1,5302	7,127
0,21	121,78	0,0010619	0,8459	1,182	511,4	2709	2198	1,5470	7,111
0,22	123,27	0,0010633	0,8098	1,235	517,8	2711	2193	1,5630	7,096
0,23	124,71	0,0010646	0,7768	1,287	524,0	2713	2189	1,5783	7,081

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,24	126,09	0,0010659	0,7465	1,340	529,8	2715	2185	1,5929	7,067
0,25	127,43	0,0010672	0,7185	1,392	535,4	2717	2182	1,6071	7,053
0,26	128,73	0,0010685	0,6925	1,444	540,9	2719	2178	1,621	7,040
0,27	129,98	0,0010697	0,6684	1,496	546,2	2721	2175	1,634	7,027
0,28	131,20	0,0010709	0,6461	1,548	551,4	2722	2171	1,647	7,015
0,29	132,29	0,0010721	0,6253	1,599	556,5	2524	2167	1,660	7,003
0,30	133,53	0,0010733	0,6057	1,651	561,4	2725	2164	1,672	6,992
0,31	134,66	0,0010744	0,5873	1,703	566,3	2727	2161	1,683	6,981
0,32	135,75	0,0010754	0,5701	1,754	571,1	2728	2157	1,695	6,971
0,33	136,82	0,0010765	0,5539	1,805	575,7	2730	2154	1,706	6,961
0,34	137,86	0,0010776	0,5386	1,857	580,2	2731	2151	1,717	6,951
0,35	138,88	0,0010786	0,5241	1,908	584,5	2732	2148	1,728	6,941
0,36	139,87	0,0010797	0,5104	1,959	588,7	2734	2145	1,738	6,932
0,37	140,84	0,0010807	0,4975	2,010	592,8	2735	2142	1,748	6,923
0,38	141,79	0,0010817	0,4852	2,061	596,8	2736	2139	1,758	6,914
0,39	142,71	0,0010827	0,4735	2,112	600,8	2737	2136	1,768	6,905
0,40	143,62	0,0010836	0,4624	2,163	604,7	2738	2133	1,777	6,897
0,41	144,51	0,0010845	0,4518	2,213	608,5	2740	2131	1,786	6,889
0,42	145,39	0,0010855	0,4416	2,264	612,3	2741	2129	1,795	6,881
0,43	146,25	0,0010865	0,4319	2,315	616,1	2742	2126	1,804	6,873
0,44	147,09	0,0010874	0,4227	2,366	619,8	2743	2123	1,812	6,865
0,45	147,92	0,0010883	0,4139	2,416	623,4	2744	2121	1,821	6,857
0,50	151,84	0,0010927	0,3747	2,669	640,1	2749	2109	1,860	6,822
0,60	156,84	0,0011007	0,31565	3,169	670,5	2757	2086	1,931	6,761

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,7	164,96	0,0011081	0,2728	3,666	697,2	2764	2067	1,992	6,709
0,8	170,42	0,0011149	0,2403	4,161	720,9	2769	2048	2,046	6,663
0,9	175,35	0,0011213	0,2149	4,654	742,8	2774	2031	2,094	6,623
1,0	179,88	0,0011273	0,1946	5,139	762,7	2778	2015	2,138	6,587
1,1	184,05	0,0011331	0,1775	5,634	781,1	2781	2000	2,179	6,554
1,2	187,95	0,0011385	0,1633	6,124	798,1	2785	1987	2,216	6,532
1,3	191,60	0,0011438	0,1512	6,614	814,5	2787	1973	2,251	6,495
1,4	195,04	0,0011490	0,1408	7,103	830,0	2790	1960	2,284	6,469
1,5	198,28	0,0011539	0,1317	7,593	844,6	2792	1947	2,314	6,445
1,6	201,36	0,0011586	0,1238	8,080	858,3	2793	1935	2,344	6,422
1,7	204,30	0,0011632	0,1167	8,569	871,6	2795	1923	2,371	6,400
1,8	207,10	0,0011678	0,1104	9,058	884,4	2796	1912	2,397	6,379
1,9	209,78	0,0011722	0,10470	9,579	896,6	2798	1901	2,422	6,359
2,0	212,37	0,0011766	0,09958	10,041	908,5	2799	4891	2,447	6,340
2,1	214,84	0,0011809	0,09492	10,540	919,8	2800	1880	2,470	6,322
2,2	217,24	0,001185	0,09058	11,030	930,9	2801	1870	2,492	6,305
2,3	219,55	0,0011892	0,08679	11,520	941,5	2801	1860	2,514	6,288
2,4	221,77	0,0011932	0,08324	12,010	951,8	2802	1850	2,534	6,272
2,5	223,93	0,0011972	0,07993	12,51	961,8	2802	1840	2,554	6,256
2,6	226,03	0,0012012	0,07688	13,01	971,7	2803	1831	2,573	6,242
2,7	228,06	0,0012050	0,07406	13,50	981,3	2803	1822	2,592	6,227
2,8	230,04	0,0012088	0,07141	14,00	990,4	2803	1813	2,611	6,213

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2,9	231,96	0,0012126	0,06895	14,50	999,4	2803	1804	2,628	6,199
3,0	233,83	0,0012163	0,06665	15,00	1008,3	2804	1796	2,646	6,186
3,2	237,44	0,0012239	0,06246	16,01	1025,3	2803	1778	2,679	6,161
3,4	240,88	0,0012310	0,05875	17,02	1041,9	2803	1761	2,710	6,137
3,6	244,16	0,0012380	0,05543	18,04	1057,3	2802	1745	2,740	6,113
3,8	247,31	0,0012450	0,05246	19,06	1072,7	2802	1729	2,769	6,091
4,0	250,33	0,0012520	0,04977	20,09	1087,5	2801	1713	2,796	6,070
4,2	253,24	0,0012588	0,04732	21,13	1101,7	2800	1698	2,823	6,049
4,4	256,05	0,0012656	0,04508	22,18	1115,3	2798	1683	2,849	6,029
4,6	258,75	0,0012724	0,04305	23,23	1128,8	2797	1668	2,874	6,010
4,8	261,37	0,0012790	0,04148	24,29	1141,8	2796	1654	2,898	5,991
5,0	263,91	0,0012857	0,03944	25,35	1154,4	2794	1640	2,921	5,973
5,5	269,4	0,0013021	0,03564	28,06	1184,9	2790	1604,8	2,976	5,930
6,0	275,56	0,0013185	0,03243	30,84	1213,9	2785	1570,8	3,027	5,890
6,5	280,83	0,0013347	0,02973	33,64	1241,3	2779	1537,5	3,076	5,851
7,0	285,80	0,0013510	0,02737	36,54	1267,4	2772	1504,9	3,122	5,814
7,5	290,50	0,0013673	0,02532	39,49	1292,7	2766	1472,8	3,166	5,79
8,0	294,98	0,0013838	0,02352	42,52	1317,0	2758	1441,2	3,208	5,745
8,5	299,24	0,0014005	0,02192	45,62	1340,8	2751	1409,8	3,248	5,711
9,0	303,32	0,0014174	0,02048	48,83	1363,7	2743	1379,3	3,287	5,678

Приложение 9

Относительная влажность воздуха (по психрометру Августа)

Показания "мокрого" термометра, °C	Влажность в % при психрометрической разности температур, °C																					
	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	216	17	18	19	20	21	22	
0	100	90	81	73	64	57	50	43	36	31	26	20	16	11	7	3						
1	100	90	82	74	66	59	52	45	39	33	29	23	19	15	11	7						
2	100	90	83	75	67	61	54	47	42	36	31	26	23	18	14	10						
3	100	90	83	76	69	63	56	49	44	39	34	29	26	21	17	13	10					
4	100	91	84	77	70	64	57	51	46	41	36	32	28	24	20	16	14	11				
5	100	91	85	78	71	65	59	54	48	43	39	34	30	27	23	19	17	13	10			
6	100	92	85	78	72	66	61	56	50	45	41	35	33	29	26	22	19	16	13	10		
7	100	92	86	79	73	67	62	57	52	47	43	39	35	31	28	25	22	18	15	12	11	
8	100	92	86	80	74	68	63	59	54	48	45	41	37	33	30	27	25	21	18	15	14	
9	100	93	86	81	75	70	65	60	55	51	47	43	39	35	32	29	27	24	21	18	17	
10	100	94	87	82	76	71	66	61	57	53	48	45	41	38	34	31	28	26	23	21	19	
11	100	94	88	82	77	72	67	62	58	55	50	47	43	40	36	33	30	28	25	23	20	
12	100	94	88	82	78	73	68	63	59	56	52	48	44	42	38	35	32	30	27	25	22	
13	100	94	88	83	78	73	69	64	61	57	53	50	46	43	40	37	34	32	29	27	24	
14	100	94	89	83	79	74	70	66	62	58	54	51	47	45	41	39	36	34	31	29	26	
15	100	94	89	84	80	75	71	67	63	59	55	52	49	46	43	41	37	35	33	31	28	

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	216	17	18	19	20	21	22
16	100	95	90	84	80	75	72	67	64	60	57	53	50	48	44	42	39	37	34	32	30
17	100	95	90	84	81	76	73	68	65	61	58	54	52	49	46	44	30	38	36	34	31
18	100	95	90	85	81	76	74	69	66	62	59	56	53	50	47	45	42	40	37	35	33
19	100	95	91	85	82	77	74	70	66	63	60	57	54	51	48	46	43	41	39	37	34
20	100	95	91	86	82	78	75	71	67	64	61	58	55	53	49	47	44	43	40	38	36
21	100	95	91	86	83	79	75	71	68	65	62	59	56	54	51	49	46	44	41	39	37
22	100	95	91	87	83	79	76	72	69	65	63	60	57	56	52	50	47	45	42	40	38
23	100	96	91	87	83	80	76	72	69	66	63	61	58	56	53	51	48	46	43	41	39
24	100	96	92	88	84	80	77	73	70	67	64	62	59	56	53	52	49	47	44	42	40
25	100	96	92	88	84	81	77	74	70	68	65	63	59	57	54	52	49	47	45	44	42

Приложение 10

Относительная влажность воздуха
(по психрометру Ассмана)

Психрометри- ческая раз- ность темпе- ратур, °С	Влажность в % при температуре сухого термометра, °С																
	-10	-8	-6	-4	-2	0	+2	+4	+6	+8	+10	+12	+14	+16	+18	+20	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
0,0	95	96	97	97	98	98	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
0,1	92	93	95	96	97	97	98	98	99	99	99	99	99	99	99	99	

Продолжение приложения 10

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
0,2	90	91	93	94	96	96	97	97	97	98	98	98	98	99	99	99
0,3	87	88	90	92	94	94	95	95	96	96	96	97	97	98	98	98
0,4	84	85	87	90	92	92	94	94	95	95	95	96	96	97	97	97
0,5	82	83	85	88	90	91	93	93	94	94	94	95	95	96	96	96
0,6	79	80	82	85	88	89	91	92	92	92	92	93	94	95	95	95
0,7	76	78	80	83	86	87	89	91	91	91	91	92	92	94	94	94
0,8	73	75	77	81	84	85	86	89	89	89	90	91	92	93	93	93
0,9	70	72	75	79	82	83	85	87	87	88	89	90	91	92	92	92
1,0	67	70	73	77	80	82	84	85	86	86	88	89	90	91	91	91
1,1	64	67	70	75	78	80	82	84	85	86	87	88	89	90	90	90
1,2	61	64	68	73	76	78	80	83	83	84	85	87	88	89	89	90
1,3	57	62	66	71	74	76	79	82	82	83	84	86	87	88	88	89
1,4	54	59	64	69	72	74	77	80	80	81	83	85	86	87	87	88
1,5	51	57	62	67	71	73	76	78	79	80	82	84	85	86	86	87
1,6	48	54	59	65	69	71	75	77	78	79	80	82	84	85	85	86
1,7	45	52	57	63	67	70	73	75	76	78	79	81	82	84	84	85
1,8	43	49	55	61	65	68	72	74	75	77	78	80	82	83	83	84
1,9	40	47	53	59	63	66	70	73	74	76	77	79	81	82	82	83
2,0	38	45	51	57	62	65	69	71	73	75	76	78	80	81	81	82
2,1	35	43	49	55	60	63	66	70	71	73	75	77	79	80	81	82
2,2	32	41	47	53	58	61	64	68	70	72	74	76	78	79	80	81
2,3	29	39	45	51	57	59	63	67	69	71	73	75	77	78	79	80
2,4	26	37	43	49	55	57	61	65	67	70	72	74	76	77	78	80
2,5	23	35	41	47	53	56	60	64	66	69	71	73	75	77	78	79
2,6	20	32	39	45	51	54	59	63	65	68	70	72	74	76	77	78
2,7	18	30	37	43	49	52	57	61	63	66	68	71	73	75	76	77
2,8	15	27	35	41	47	51	56	60	62	65	67	70	72	74	75	76

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
2,9	12	24	33	39	45	49	55	59	61	64	66	69	71	73	74	75
3,0	10	22	32	38	44	48	53	58	60	63	65	68	70	72	73	74
3,1	-	20	30	36	42	46	51	56	58	61	64	67	69	71	72	73
3,2	-	19	28	34	41	45	49	54	57	60	63	66	68	70	72	72
3,3	-	16	26	32	39	43	48	53	55	59	62	65	67	69	71	71
3,4	-	14	24	30	37	42	47	52	54	58	61	64	66	68	70	70
3,5	-	12	23	29	36	41	46	50	53	57	60	63	65	67	69	70
3,6	-	-	21	27	34	39	44	48	52	55	59	62	64	66	68	69
3,7	-	-	20	26	33	38	43	47	51	54	58	61	63	65	67	68
3,8	-	-	18	24	31	36	41	46	50	53	57	60	62	64	66	68
3,9	-	-	16	23	30	35	40	44	48	52	56	59	61	63	65	67
4,0	-	-	15	22	29	33	39	43	47	51	54	57	60	62	64	66
4,1	-	-	-	19	26	30	36	41	45	48	52	55	58	61	62	64
4,2	-	-	-	19	26	30	36	41	45	48	52	55	58	61	62	64
4,4	-	-	-	16	24	27	33	39	42	46	50	53	56	58	60	63
4,6	-	-	-	13	21	25	31	36	40	44	48	51	54	57	59	61
4,8	-	-	-	11	19	22	28	33	38	42	46	50	53	55	58	60
5,0	-	-	-	9	17	20	25	31	36	40	44	48	51	54	56	58
5,2	-	-	-	-	-	-	22	28	34	38	42	46	50	52	54	56
5,4	-	-	-	-	-	-	19	26	31	36	40	44	48	50	52	54
5,6	-	-	-	-	-	-	17	23	29	34	38	42	46	48	50	53
5,8	-	-	-	-	-	-	14	20	27	32	36	40	44	47	49	52
6,0	-	-	-	-	-	-	12	18	25	30	34	38	42	46	48	51
6,2	-	-	-	-	-	-	-	16	23	28	32	36	41	44	47	49
6,4	-	-	-	-	-	-	-	13	21	26	30	34	39	42	45	47
6,6	-	-	-	-	-	-	-	11	18	24	28	32	37	41	44	46
6,8	-	-	-	-	-	-	-	9	16	22	26	31	36	40	43	45

Окончание приложения 10

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
7,0	-	-	-	-	-	-	-	7	14	20	24	29	34	38	41	44
7,2	-	-	-	-	-	-	-	-	12	18	22	27	33	36	39	42
7,4	-	-	-	-	-	-	-	-	10	16	20	25	31	34	37	40
7,6	-	-	-	-	-	-	-	-	8	14	16	24	29	33	36	39
7,8	-	-	-	-	-	-	-	-	6	12	16	22	27	31	35	38
8,0	-	-	-	-	-	-	-	-	4	10	15	20	25	30	34	36
8,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12	18	24	28	32	35
8,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	16	23	27	31	33
8,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	21	25	30	32
8,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12	19	24	29	31
9,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11	18	23	27	30
9,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16	21	26	29
9,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	20	24	27
9,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13	18	23	26
9,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11	17	21	25
10,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	16	20	24
10,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	18	22
10,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13	17	21
10,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11	15	19
10,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	14	18
11,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	13	17
11,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11	16
11,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	15
11,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9	14
11,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	13
12,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	11

Содержание

Общие указания	3
Измерения физических величин	5
Измерение температуры	5
Измерение давления	9
Определение массы вещества	17
Измерение количества электрической энергии	19
Измерение количества тепловой энергии	22
Измерение влажности воздуха	24
Оценка погрешности эксперимента	29
ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ	
Лабораторная работа № 1	34
Лабораторная работа № 2	42
Лабораторная работа № 3	48
Лабораторная работа № 4	56
Лабораторная работа № 5	63
Литература	70
Приложение 1. Некоторые основные и производные единицы	71
Приложение 2. Множители и приставки для образования кратных и дольных единиц	71
Приложение 3. Молярные массы, плотности, критические параметры и газовые постоянные некоторых идеальных газов	72
Приложение 4. Соотношения между единицами измерения давления	73
Приложение 5. Истинные и средние теплоемкости идеальных газов в кДж/(кмоль·К)	74
Приложение 6. Физические свойства воды на линии насыщения	77
Приложение 7. Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по температуре)	78
Приложение 8. Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по давлению)	80
Приложение 9. Относительная влажность воздуха (по психрометру Августа)	85
Приложение 10. Относительная влажность воздуха (по психрометру Ассмана)	86

Учебное издание

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

Лабораторный практикум
для студентов специальности
1–70 04 02 «Теплогазоснабжение, вентиляция
и охрана воздушного бассейна»

С о с т а в и т е л и :

СТАНЕЦКАЯ Ирина Ивановна
КАЛИНИЧЕНКО Екатерина Сергеевна
АКЕЛЬЕВ Валерий Дмитриевич
НЕСТЕРОВ Лев Валентинович

Технический редактор М.И. Гриневич
Компьютерная верстка О.В. Дубовик

Подписано в печать 24.05.2006.

Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 5,54. Уч.-изд. л. 4,18. Тираж 190. Заказ 574.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0131627 от 01.04.2004.

220013, Минск, проспект Независимости, 65.