

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-  
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Кафедра теплоэнергетики, газоснабжения и вентиляции

**ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА**

Методические указания и  
задания к контрольным работам  
для студентов направления подготовки 08.03.01 «Строительство»  
направленность (профиль) «Теплогазоснабжение, вентиляция,  
водоснабжение и водоотведение зданий, сооружений и населенных  
пунктов»

Казань 2018

УДК 536.7  
ББК 22.37  
М42

М42 Методические указания и задания к контрольным работам по дисциплине «Техническая термодинамика» для студентов направления подготовки 08.03.01 «Строительство», направленность (профиль) «Теплогасоснабжение, вентиляция, водоснабжение и водоотведение зданий, сооружений и населенных пунктов» / Сост.: Г.А. Медведева. Казань: КГАСУ, 2018. – 25 с.

Печатается по решению Редакционно-издательского совета Казанского государственного архитектурно-строительного университета

Методические указания и контрольные задачи для студентов-заочников составлены в соответствии с рабочей программой по дисциплине «Техническая термодинамика».

Табл. 10; илл. 2; библи. 8 наим.

Рецензент: профессор кафедры энергетическое машиностроение  
Казанского государственного энергетического университета, д.т.н.  
Таймаров М.А.

УДК 636.7  
ББК 22.37

© Казанский государственный  
архитектурно-строительный  
университет, 2018  
© Медведева Г.А. 2018

## Содержание

Введение .....	4
1. Основные понятия в термодинамике .....	5
2. Термические параметры .....	5
3. Уравнение состояния идеального газа .....	7
4. Теплоемкость .....	7
5. Энтальпия .....	8
6. Основные термодинамические процессы .....	8
7. Водяной пар и его свойства.....	9
8. Влажный воздух. ....	11
Контрольная работа № 1 .....	18
Задача № 1 .....	18
Задача № 2.....	19
Задача № 3 .....	20
Задача № 4.....	21
Задача № 5 .....	22
Задача № 6.....	23
Список литературы.....	24

## ВВЕДЕНИЕ

Техническая термодинамика изучает закономерности взаимного превращения теплоты и механической энергии в термодинамических системах, а также свойства рабочих тел, участвующих в этих превращениях. Главной задачей ее является отыскание предельных и наиболее рациональных способов взаимного превращения теплоты и работы.

Термодинамика учит различать формы энергии. Основой технической термодинамики являются два закона (начала), которые установлены опытным путем. Термодинамика устанавливает связи между различными формами энергии по энергетическим балансам первого начала и выясняет условия и границы взаимопреобразований различных форм энергии в естественных явлениях и технических процессах на основе второго начала. Термодинамика оперирует понятиями макрофизической природы (такими, как температура, давление и т. п., которые могут быть непосредственно измерены или вычислены с помощью измеренных величин) и не рассматривает внутреннего молекулярного строения тел. Такой макрофизический подход обеспечивает достоверность общих выводов термодинамики, которые, в свою очередь, привлекают дополнительные сведения из физики, химии и т.д. Описание процессов в термодинамике основывается на понятии макроскопического равновесия системы. Процессы рассматриваются как непрерывная последовательность состояний равновесия.

Для студентов института строительных технологий и инженерно-экологических систем техническая термодинамика является необходимой связующей основой различных профилирующих дисциплин, таких как гидравлика, теплопередача, тепломассообмен, газоснабжение, энергосбережение и т.д. Для студентов главное – уяснить предмет и основные идеи термодинамики, освоить сложившуюся терминологию, разобраться в физической сущности рассматриваемых процессов, уметь геометрически их интерпретировать, научиться ориентироваться в многообразии таблиц и диаграмм и грамотно их использовать.

## 1. Основные понятия в термодинамике

Термодинамика – наука о макросистемах, состоящих из огромного числа отдельных частиц (молекул, атомов, электронов и т.д.). Термодинамика - наука о закономерностях превращения энергии.

Термодинамической системой называется совокупность материальных тел, взаимодействующих, как между собой, так и с окружающей средой. Все тела находящиеся за пределами границ рассматриваемой системы называются окружающей средой. Физическое состояние рабочего тела характеризуется совокупностью величин, которые называются параметрами состояния.

Изменение состояния рабочего тела, вызванное воздействием на него внешней средой и характеризующееся изменением параметров состояния, называется термодинамическим процессом. Процесс – совокупность состояний рабочего тела, соответствующая некоторой непрерывной последовательности значений параметров состояния. Переход между двумя бесконечно близкими состояниями рабочего тела, т.е. между состояниями, отличающимися бесконечно малыми изменениями параметров, вызванными бесконечно малым вмешательством извне, называется бесконечно малым, или элементарным процессом.

Равновесный термодинамический процесс представляет собой непрерывную последовательность равновесных состояний рабочего тела. Равновесные процессы – это идеализация реальных процессов, так как мгновенного выравнивания всех параметров системы в объеме и во времени не происходит.

Неравновесный термодинамический процесс представляет собой последовательность состояний, среди которых не все являются равновесными. Все реальные процессы – неравновесные, так как они протекают с конечными скоростями, и равновесное состояние не успевает устанавливаться.

## 2. Термические параметры

Для однородного рабочего тела за термические параметры его термодинамического равновесного состояния приняты удельный объем ( $v$ ), абсолютное давление ( $p$ ) и абсолютная температура ( $T$ ). Эти параметры поддаются непосредственному определению.

**Удельный объем** ( $v$ , м<sup>3</sup>/кг) – объем единицы массы вещества:

$$v = \frac{1}{\rho} = \frac{V}{m}$$

Величина, обратная удельному объему, называется плотностью вещества ( $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>):

$$\rho = m/V$$

**Абсолютное давление** ( $p$ , Па = Н/м<sup>2</sup>) – сила, действующая по нормали к поверхности тела и отнесенная к единице площади этой поверхности:

В стандартной системе измерения СИ единицей служит Паскаль (Па). Для газов и паров давление является усредненной силой действия большого числа молекул на поверхность границы. Давление характеризует взаимодействие рабочего тела с внешней средой. Если рабочее тело находится в состоянии равновесия, то давление одинаково во всех его частях и равно внешнему давлению.

**Температура** (мера нагретости тела) характеризует интенсивность теплового хаотического движения молекул рабочего тела, т.е. его тепловое состояние. При наличии термодинамического равновесия температура тела определена однозначно. В неравновесных состояниях понятие температуры теряет смысл: в этом случае обычно рассматривают температуру достаточно малых частей тела и изучают тепловые потоки в теле.

В термодинамике для измерения температуры принята термодинамическая шкала Кельвина, в которой началом отсчета служит так называемый абсолютный ноль температур, а точка таяния льда находится на уровне  $T = 273,15$  К. Связь между этими температурами, измеренными по шкале Цельсия ( $t$ ) и шкале Кельвина ( $T$ ), следующая:

$$T = t + 273,15, \text{ К.}$$

Температура, измеренная по шкале Кельвина ( $T$ ), носит название абсолютной температуры.

Для сравнения величин, характеризующих рабочее тело в одинаковых состояниях, вводится понятие нормальные физические условия:

$$p = 101325 \text{ Па} = 760 \text{ мм рт. ст.}; T = 273,15 \text{ К.}$$

Термические параметры однородного рабочего тела, находящегося в равновесном состоянии, (абсолютное давление –  $p$ , абсолютная температура –  $T$  и удельный объем –  $v$ ) не могут принимать произвольные значения. Они связаны между собой соотношением, которое в термодинамике называют уравнением состояния:

$$F(p, v, T) = 0 \quad (1)$$

Таким образом, состояние равновесия однородного вещества определяется двумя независимыми параметрами ( $p$  и  $T$ , или  $p$  и  $v$ , или  $T$  и  $v$ ). Эта функциональная связь (1) индивидуальна для каждого рабочего тела. Каждое равновесное состояние в пространстве ( $p, v, T$ ) изображается точкой; геометрическое место точек, представляющих все возможные состояния рабочего вещества, является поверхностью в этом пространстве, уравнение которой есть (1).

### 3. Уравнение состояния идеального газа

Под идеальным газом понимается газ, в котором силы межмолекулярного взаимодействия (притяжение и отталкивание) отсутствуют, а сами молекулы рассматриваются как материальные точки. Идеальный газ подчиняется уравнению Клайперона– Менделеева:

$$pV = \frac{m}{\mu} R_{\mu} T, \quad (2)$$

где  $m$  – масса газа в системе;  $\mu$  – молярная масса газа;  $R_{\mu} = 8314 \text{ Дж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$  – универсальная газовая постоянная, которая не зависит ни от вида газа, ни от условий его существования. В удельных величинах (т.е. для 1 кг газа) уравнение (2) будет иметь вид:

$$pv = RT,$$

где  $R$  – удельная газовая постоянная,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ .

### 4. Теплоемкость

Сообщение рабочему телу теплоты в каком-либо процессе вызывает изменение его состояния и, в общем случае, сопровождается изменением температуры. Изменение температуры, как и любого другого параметра состояния рабочего тела, не зависит от вида процесса, а зависит от его начального (1) и конечного (2) состояния, т.е.  $\Delta T = T_2 - T_1$  (для элементарного процесса изменение параметра заменяется его дифференциалом  $dT$ ).

Отношение количества теплоты  $\delta Q$ , сообщаемого телу, к изменению температуры тела  $dT$  в элементарном термодинамическом процессе называется *истинной теплоемкостью* тела в данном процессе:

$$C_x = \frac{\delta Q}{dT} \quad (3)$$

Нижний индекс здесь указывает на то обстоятельство, что теплоемкость так же, как и теплота, зависит от характера процесса. Кроме того, теплоемкость зависит от количества тела и его термодинамического состояния.

В зависимости от выбранной единицы количества вещества различают массовую, объемную и мольную удельные теплоемкости:

– если за единицу вещества принять единицу массы (1 кг), то удельную теплоемкость называют *массовой* ( $c_x = C_x/m$ ),  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;

– если за единицу вещества принять единицу объема (1 м<sup>3</sup>) при нормальных физических условиях, то удельную теплоемкость называют *объемной* ( $c'_x$ ),  $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ . Необходимость отнесения объемной теплоемкости к фиксированному объему связана с тем, что 1 м<sup>3</sup> газа при различных температурах и давлениях содержит различное количество

вещества. Очевидно, что  $c' = \rho_0 c$ , где  $\rho_0$  – плотность газа при нормальных физических условиях;

– *мольной теплоемкостью* ( $\mu c_x$ ) называют теплоемкость одного моля вещества, Дж/(моль·К). Массовая теплоемкость вычисляется как  $c = \frac{\mu c}{\mu}$ . Объемная теплоемкость –  $c' = \rho_0 c = \rho_0 \frac{\mu c}{\mu} = \frac{RT_0}{p_0} \cdot \frac{\mu c}{\mu} = \frac{\mu c}{p_0 / (R_\mu T_0)} = \frac{\mu c}{22,4}$ .

$$\text{Уравнение} \quad \delta q = du + p dv \quad (4)$$

называют первым началом термодинамики: подведенная к закрытой покоящейся термодинамической системе теплота расходуется на изменение внутренней энергии системы и на совершение работы по изменению объема системы. Балансовое соотношение (4) называют еще первой основной формой первого начала термодинамики.

## 5. Энтальпия

Важное значение в термодинамике имеет сумма внутренней энергии системы  $U$  и произведения давления системы  $p$  на объем системы  $V$ :

$$H = U + pV, \quad (5)$$

эта величина называется *энтальпией*.

Произведение  $pV$  представляет собой так называемую работу проталкивания (если рассматривать тело в форме цилиндра объемом  $V = hS$ , где  $h$  – высота, а  $S$  – площадь основания, то  $L = pSh = pV$ ).

Таким образом, *энтальпия* есть полная энергия, связанная с данным состоянием тела, и состоит из внутренней энергии системы и работы, которую нужно было затратить для того, чтобы ввести это тело (объемом  $V$ ) во внешнюю среду (с давлением  $p$ ). Для удельной энтальпии можно записать

$$h = u + pv \quad (6)$$

Энтальпия измеряется в тех же величинах, что и теплота, и работа, и внутренняя энергия.

Выразив внутреннюю энергию через энтальпию и подставив в (4), получим другое выражение для первого начала термодинамики:

$$\delta q = dh - v dp, \quad (7)$$

которое называется второй основной формой первого начала термодинамики, а выражение  $\delta l_0 = -v dp$  называется располагаемой работой.

## 6. Основные термодинамические процессы

Практический интерес представляют следующие процессы:



– *изохорный*, протекающий при постоянном объеме (на практике – это процесс, проходящий с веществом, заключенном в закрытой емкости с жесткими стенками);

– *изобарный* – при постоянном давлении (на практике – это процесс, проходящий с веществом, заключенном в резервуаре с клапаном, настроенным на заданное давление);

– *изотермический* – при постоянной температуре (на практике осуществить такой процесс достаточно трудно, так как для обеспечения выравнивания температуры газа по всему объему процесс должен происходить по времени бесконечно медленно);

– *адиабатный* – без теплообмена с окружающей средой (на практике все быстропротекающие процессы достаточно близки к адиабатным, так как за время протекания этих процессов теплообменом с окружающей средой можно пренебречь в силу его малости);

– *политропный процесс*, который является обобщением вышеперечисленных процессов (все реальные процессы можно рассматривать как совокупную последовательность таких процессов).

Так как в качестве рабочего тела в этих процессах будем рассматривать идеальный газ, то его основные параметры подчиняются уравнению состояния

$$pv = RT.$$

## 7. Водяной пар и его свойства

Во многих областях промышленного производства получил большое применение пар различных веществ – воды, аммиака, углекислоты и др. Из них наибольшее распространение получил водяной пар, являющийся рабочим телом в паровых турбинах, паровых машинах, в атомных установках, теплоносителем в различных теплообменниках и т.п.

Водяной пар относится к реальным газам. Известные уравнения состояния для водяного пара сложны (их реализация возможна на персональных компьютерах), для инженерных расчетов применяются таблицы и диаграммы воды и водяного пара, полученные экспериментально или вычисленные по уравнениям состояния.

Как известно из курса общей физики, вода (как и всякое вещество) в зависимости от внешних условий (давления и температуры) может находиться в различных агрегатных (или фазовых) состояниях – газообразном, жидком и твердом.

Для равновесных состояний каждой фазы вещества существует термическое уравнение состояния

$$F(p, v, T) = 0, \quad (8)$$

которое находят путем измерения параметров  $p$ ,  $v$ ,  $T$ , т.е. экспериментально.

Состояние вещества представляется точкой на поверхности (8), а произвольный процесс – линией на этой поверхности. Для удобства пользуются не пространственным изображением, а соответствующими проекциями на различные плоскости.

### ***hs*-диаграмма водяного пара**

На рис. 1 изображена *hs*-диаграмма водяного пара.

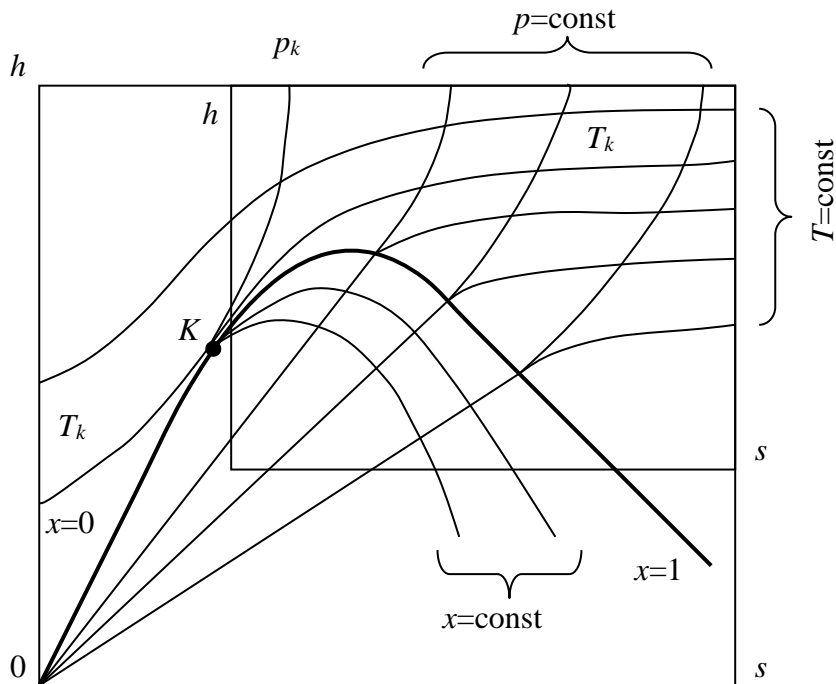


Рис. 1

За начало координат в *hs*-диаграмме принято состояние в тройной точке. По оси абсцисс откладывается удельная энтропия  $s$ , а по оси ординат – удельная энтальпия  $h$ .

На диаграмму наносятся пограничные кривые воды и пара, соответственно,  $x = 0$  и  $x = 1$  (жирная кривая), изобары –  $p = \text{const}$ , изотермы –  $T = \text{const}$  и линии постоянной сухости –  $x = \text{const}$ . В области влажного пара ( $0 < x < 1$ ) изотермы и изобары совпадают.

На диаграмму наносятся также сетка изохор ( $v = \text{const}$ ), которые на рис. 1 не изображены.

В практике могут встретиться паровые процессы, которые протекают полностью в области либо влажного, либо перегретого пара, либо так, что одна часть процесса протекает в области влажного, а другая – в области перегретого пара.

Исследование процесса состоит в определении начальных и конечных параметров пара, изменений внутренней энергии, энтальпии и подведенного (отведенного) количества теплоты.

Диаграмма позволяет по двум известным (независимым) термодинамическим параметрам определить все остальные.

По известным начальному и конечному состояниям процесса можно определить изменение внутренней энергии по формуле

$$\Delta u = u_k - u_n = (h_k - p_k v_k) - (h_n - p_n v_n) \quad (9)$$

Удельная теплота процесса определяется по формулам:

- для изохорного процесса ( $v = \text{const}$ )  
 $q = \Delta u = h_k - h_n - v(p_k - p_n)$ ;
- для изобарного процесса ( $p = \text{const}$ )  $q = h_k - h_n$ ;
- для изотермического процесса ( $T = \text{const}$ )  $q = T(s_k - s_n)$ ;
- для адиабатного (обратимого изэнтропического) процесса ( $s = \text{const}$ )  $q = 0$ .

Удельная работа процесса рассчитывается по формуле

$$l = q - \Delta u \quad (10)$$

Графический метод расчета по  $hs$ -диаграмме является наглядным, относительно малотрудоемким, но недостаточно точным. Для получения более точных данных используются соответствующие формулы и таблицы воды и водяного пара [8].

## 8. Влажный воздух

В атмосферном воздухе всегда есть влага в виде водяного пара, содержание которого зависит от метеоусловий, а также от наличия источников испарения воды и колеблется в широких пределах: от малых долей до 4 % (по массе). Влажность воздуха – важнейший параметр, определяющий комфортность окружающей среды, которая в помещениях искусственно поддерживается с помощью систем отопления, вентиляции и кондиционирования. С атмосферным воздухом также приходится иметь дело в некоторых теплотехнических процессах (например, в процессе сушки). Воздух используется в качестве охладителя на тепловых электростанциях с циркуляционным оборотом воды, расположенных далеко от источников водоснабжения.

Смесь сухого воздуха (не содержащего молекул воды) с водяным паром называется *влажным воздухом*.

Влажный воздух представляет собой один из частных случаев газовых смесей. Принципиальное отличие влажного воздуха от обычных газовых смесей заключается в том, что количество водяного пара в смеси

не может быть произвольным: оно зависит от температуры и полного давления смеси и не может превышать определенного значения.

Для практики представляет интерес влажный воздух при атмосферном давлении  $B$  с температурами не ниже  $-50$  °С. При таких параметрах сухой воздух находится всегда в газообразном состоянии, тогда как водяной пар в зависимости от температуры смеси может перейти в жидкую или твердую фазу и вследствие этого выпасть из смеси.

В процессах изменения состояния влажного воздуха водяной пар может вводиться или удаляться из влажного воздуха, стабильным остается только масса сухого воздуха. Поэтому все характеризующие влажный воздух удельные величины относятся к 1 кг сухого воздуха, а не к 1 кг смеси. При невысоких давлениях (близких к атмосферному) и сухой воздух, и содержащийся в нем водяной пар можно рассматривать как идеальные газы.

Рассматривая влажный воздух как газовую смесь, по закону Дальтона имеем:

$$p = p_{\text{воздух}} + p_{\text{пар}} \quad \text{или} \quad B = p_{\text{воздух}} + p_{\text{пар}} \quad (11)$$

Чем больше водяного пара находится в паровоздушной смеси, тем больше парциальное давление  $p_{\text{пар}}$ . Влажный воздух, содержащий максимальное количество водяного пара при данной температуре (пар в насыщенном состоянии), называется *насыщенным*. В противном случае, воздух называется *ненасыщенным* (а пар в нем – перегретый).

Парциальное давление водяного пара при заданной температуре смеси (температуре влажного воздуха) не может превышать давления насыщения  $p_s$ , т.е.  $p_{\text{пар}} \leq p_s$ . Для ненасыщенного влажного воздуха –  $p_{\text{пар}} < p_s$ , а для насыщенного –  $p_{\text{пар}} = p_s$ . Водяной пар, содержащийся в ненасыщенном влажном воздухе ( $p_{\text{пар}} < p_s$ ), находится в перегретом состоянии, его температура  $t > t_s(p_{\text{пар}})$ . Таким образом, ненасыщенный влажный воздух состоит из сухого воздуха и перегретого водяного пара, а насыщенный влажный воздух – из сухого воздуха и насыщенного водяного пара.

Водяной пар содержится в воздухе обычно в небольших количествах и в перегретом состоянии. Масса пара, содержащегося в  $1 \text{ м}^3$  влажного воздуха, называется *абсолютной влажностью*:

$$D = \frac{M_{\text{пар}}}{V} = \frac{M_{\text{пар}}}{V_{\text{пар}}} = \rho_{\text{пар}}, \quad \text{кг/м}^3, \quad (12)$$

т.е. абсолютная влажность численно равна плотности пара  $\rho_{\text{пар}}$  при парциальном давлении  $p_{\text{пар}}$ . Параметр  $D$  при заданной температуре может принимать значения от 0 (сухой воздух) до плотности насыщенного пара, равной  $1/v''$  (насыщенный воздух).

*Относительной влажностью* воздуха называется отношение его реальной абсолютной влажности  $D$  к максимально возможной абсолютной влажности  $D_{\max}$  при той же температуре:

$$\varphi = \frac{D}{D_{\max}} = \frac{\rho_{\text{пар}}}{\rho_s} = \frac{p_{\text{пар}}/(R_{\text{пар}}T)}{p_s/(R_{\text{пар}}T)} = \frac{p_{\text{пар}}}{p_s} \quad (13)$$

Таким образом, относительная влажность определяется отношением парциального давления водяного пара к давлению насыщения при данной температуре (т.е. максимально возможному парциальному давлению водяного пара при этой температуре). Другими словами, относительная влажность отражает степень насыщения влажного воздуха водяным паром при данной температуре.

Во всех случаях  $\varphi \leq 1$ . Обычно относительную влажность выражают в процентах. Для сухого воздуха  $\varphi = 0$ , для насыщенного воздуха  $\varphi = 100\%$ .

Отношение массы пара к массе сухого воздуха называется *влажностью* (или *паросодержанием*):

$$d = \frac{M_{\text{пар}}}{M_{\text{воздух}}} = \frac{\rho_{\text{пар}}}{\rho_{\text{воздух}}} \quad (14)$$

Параметр  $d$  представляет собой массу влаги, приходящейся на 1 кг сухого воздуха. Эту безразмерную величину задают либо в кг/кг, либо в г/кг. Параметр  $d$  может принимать значения от 0 до  $\infty$ .

Величину влагосодержания можно определить следующим образом. Уравнения состояния для сухого воздуха и водяного пара ( $p_{\text{воздух}}V = R_{\text{воздух}}TM_{\text{воздух}}$  и  $p_{\text{пар}}V = R_{\text{пар}}TM_{\text{пар}}$ ) разделим почленно:

$$\frac{p_{\text{воздух}}}{p_{\text{пар}}} = \frac{M_{\text{воздух}}R_{\text{воздух}}}{M_{\text{пар}}R_{\text{пар}}} = \frac{M_{\text{воздух}}287,04}{M_{\text{пар}}461,6} = \frac{0,622}{d}$$

Найдем отсюда влагосодержание, подставив в это уравнение значение  $p_{\text{воздух}}$  из закона Дальтона (11):

$$d = 0,622 \frac{p_{\text{пар}}}{p - p_{\text{пар}}} \quad (15)$$

Из уравнения видно, что с увеличением парциального давления пара влагосодержание увеличивается.

Максимальное значение влагосодержания зависит от температуры и давления влажного воздуха: при заданной температуре влажного воздуха максимум давления водяного пара равен давлению насыщения  $p_s$  при этой температуре, следовательно, максимальное влагосодержание

$$d_s = 0,622 \frac{p_s(T)}{p - p_s(T)}. \quad (16)$$

Так как  $p_s$  увеличивается с ростом температуры, то с ростом температуры влажного воздуха увеличивается и его максимальное влагосодержание.

Отсюда, в частности, следует: если влажный воздух находится при атмосферном давлении  $B$ , то при температуре влажного воздуха в  $100\text{ }^\circ\text{C}$  максимальное паросодержание  $d_s = \infty$  (чистый водяной пар).

Из уравнений (6.2) и (6.3) можно получить выражение, связывающее влагосодержание с относительной влажностью:

$$d = 0,622 \frac{\varphi p_s}{p - \varphi p_s} \text{ или } \varphi = \frac{d}{0,622 + d} \frac{p}{p_s}.$$

Понижая температуру ненасыщенного влажного воздуха ( $\varphi < 1$ ) при постоянном давлении, его можно довести до состояния насыщения ( $\varphi = 1$ ). Это произойдет в тот момент, когда температура воздуха станет равной температуре сухого насыщенного пара при данном парциальном давлении его в воздухе, т.е.  $T = T_s(p_{\text{пар}})$ . Температура, при которой воздух с данным влагосодержанием  $d$  становится насыщенным ( $\varphi = 1$ ), называется *температурой точки росы* и обозначается  $t_p$ . При дальнейшем охлаждении влажного воздуха из него начнет выделяться вода в виде тумана или росы (происходит конденсация пара) и, следовательно, влагосодержание влажного воздуха  $d$  будет уменьшаться, при этом воздух будет оставаться влажным насыщенным ( $\varphi = 1$ ).

### ***hd*-диаграмма влажного воздуха**

Параметры влажного воздуха для практических целей определяют либо по таблицам, либо по диаграммам. Второй способ менее точный, но более наглядный.

Определение параметров влажного воздуха графическим способом рассмотрим с помощью *hd*-диаграммы, предложенной в 1918 г. проф. Л.К. Рамзиным.

На этой диаграмме все удельные величины относятся к 1 кг сухого воздуха. По оси ординат откладывается удельная энтальпия  $h$  (кДж/кг) влажного воздуха, а по оси абсцисс – влагосодержание  $d$  (г/кг) влажного воздуха. Для более удобного расположения различных линий (изотерм и линий постоянной относительной влажности) на диаграмме эти координатные оси составляют угол  $135^\circ$  (рис. 2). Таким образом, линии постоянного влагосодержания будут вертикальными прямыми, а линии постоянства энтальпии – наклонными прямыми.

Кроме того, на диаграмме нанесены (на рис. 2 они отсутствуют) следующие линии:

- линии постоянных температур ненасыщенного влажного воздуха ( $t = \text{const}$ ). Так как энтальпия при фиксированной температуре  $t$  линейно зависит от влагосодержания  $d$ , то эти линии - прямые;
- линии относительной влажности воздуха ( $\varphi = \text{const}$ );
- линия парциального давления водяного пара.

Все поле диаграммы разделено на две части линией  $\varphi = 100\%$ : выше её находится область ненасыщенного влажного воздуха, ниже линии – область перенасыщенного состояния воздуха.

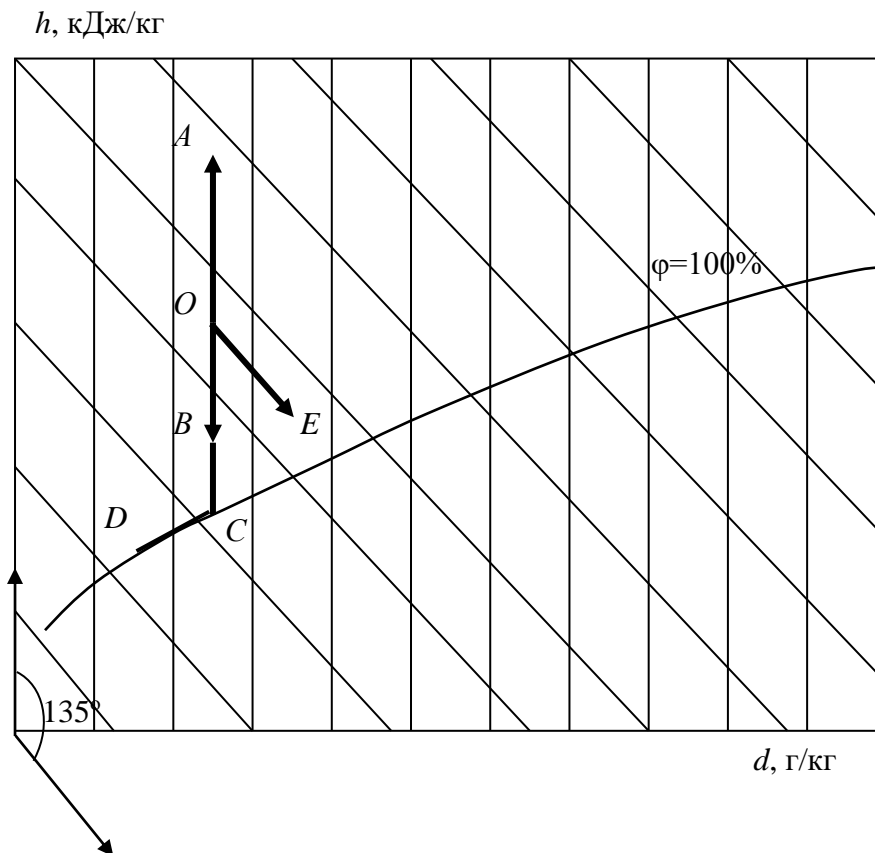


Рис. 2

Обычно диаграмма приводится для барометрического давления  $0,09930$  МПа (745 мм рт. ст.), но с достаточной степенью точности она может быть использована и для других близких давлений.

С помощью  $hd$ -диаграммы можно определить все необходимые параметры влажного воздуха: удельную энтальпию  $h$ , влагосодержание  $d$ , температуру  $t$ , температуру точки росы (на рис. 2 точка росы – точка  $C$ ), относительную влажность  $\varphi$ , парциальное давление, если известны только два из этих параметров.

$hd$ -диаграмма удобна не только для определения параметров состояния воздуха, но и для отображения изменений его состояния при нагревании, охлаждении, увлажнении, осушении и других процессов:

- процесс нагревания влажного воздуха совершается при неизменном влагосодержании, т.е. при  $d = \text{const}$  (на диаграмме – вертикальная прямая  $O-A$  вверх от исходного положения);

- процесс охлаждения влажного воздуха также протекает при  $d = \text{const}$  (вертикальная прямая вниз –  $O-B$ ). Этот процесс справедлив

только до состояния полного насыщения воздуха, т.е. до  $\varphi = 100\%$  (вертикальная прямая до пересечения с линией  $\varphi = 100\%$  –  $O-C$ ). При дальнейшем охлаждении воздух окажется пересыщенным влагой, и она будет выпадать в виде росы на материале;

– процесс конденсации можно считать проходящим по линии  $\varphi = 100\%$  (продвижение от точки пересечения влево до пересечения с линией заданной конечной температурой –  $C-D$ ). Количество воды, образовавшейся в результате конденсации от точки  $C$  до точки  $D$ , на 1 кг сухого воздуха равно разности влагосодержаний  $d_C - d_D$ ;

– адиабатный процесс увлажнения (осушения) в условиях постоянного давления происходит при неизменной энтальпии влажного воздуха ( $h = \text{const}$ ) и изобразится на  $hd$ -диаграмме отрезком  $O-E$ . Здесь имеется в виду идеальный процесс насыщения влажного воздуха, т.е. не учитываются расход энергии на подогрев жидкости и связанные с этим потери в окружающую среду.

$hd$ -диаграмма влажного воздуха широко используется в отопительно-вентиляционной практике и в теплотехнических расчетах, связанных с сушильной техникой.

Таким образом, техническая термодинамика рассматривает вопросы взаимного превращения тепловой и механической энергии и условия осуществления этих превращений. В курсе технической термодинамики изучаются свойства рабочих тел и способы определения термодинамических параметров состояния. В качестве рабочего тела выступает вещество в газообразной или парообразной форме – идеальный газ и реальный газ. При анализе термодинамических процессов необходимо выяснить закономерности изменения основных параметров состояния рабочего тела ( $P, V, T$ ), а также количества тепла ( $q$ ), работу ( $L$ ) расширения (сжатия) рабочего тела, изменение внутренней энергии рабочего тела ( $\Delta U$ ), изменение энтальпии ( $\Delta h$ ) и изменение энтропии ( $\Delta S$ ) (в ходе процесса). Для определения количества тепла, участвующего в процессе, важно правильно использовать теплоемкость рабочего тела. Необходимо понять зависимость теплоемкости рабочего тела от физической природы вещества, от температуры и от характера термодинамического процесса.

Следует обратить внимание, что при изображении термодинамического процесса в координатах  $P-V$  площадь между линией процесса и осью абсцисс дает графическое изображение работы 1 кг рабочего тела в этом процессе – работы расширения (если  $V_2 > V_1$ ) или сжатия (если  $V_2 < V_1$ ). При изображении термодинамического процесса в координатах  $T-S$  площадь между линией процесса и осью абсцисс дает графическое изображение количества тепла, подводимого к рабочему телу или тепла, отводимого от рабочего тела, если  $S_2 < S_1$ . Надо понять



физический смысл энтальпии и энтропии, освоить их использование в расчетах термодинамических процессов. Введение этих величин дает возможность применять для анализа термодинамических процессов диаграмму  $h-S$ , которая нашла широкое признание в инженерной практике, например, для расчета процессов изменения состояния водяного пара.

Курс, технической термодинамики базируется на двух принципиальных положениях – первом и втором законах термодинамики.

Первый закон термодинамики отражает закон сохранения и превращения энергии применительно к термодинамическому процессу. Он усиливает эквивалентность при взаимных превращениях механической и тепловой энергии в количественное соотношение при переходе одного вида энергии в другой. Уравнение первого закона термодинамики является энергетическим балансом рабочего тела. Оно записывается в форме, где связаны между собой количество тепла, работа, совершаемая рабочим телом против внешних сил, и изменение внутренней энергии в процессе или в форме, где связаны между собой количество тепла, изменение энтальпии и располагаемая работа.

Второй закон термодинамики определяет направление, в котором протекает термодинамический процесс, устанавливает условия преобразования тепловой энергии в механическую, а также определяет максимальное значение работы, которая может быть произведена тепловым двигателем.

Специальный раздел курса посвящен водяному пару и влажному воздуху. Необходимо уметь пользоваться таблицами водяного пара и диаграммами ( $P-V$ ,  $h-S$ ) и диаграммой  $h-d$  влажного воздуха.

### ЗАДАНИЯ К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ

Студент должен выполнить контрольную работу, которая состоит из шести задач. Условия задач выбираются в соответствии с двумя последними цифрами учебного шифра.

## КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

### Задача № 1. Расчет газовой смеси.

Газовая смесь состоит из нескольких компонентов, содержание которых в смеси в процентах по объему (таблица 1).

Определить:

1. Кажущуюся молекулярную массу смеси;
2. Газовую постоянную смеси;
3. Среднюю мольную и объемную и массовую теплоемкости смеси при постоянном давлении в пределах температур от  $t_1$  до  $t_2$  (таблица 2).

При решении этой задачи и последующих задач для всех исходных и итоговых величин, кроме относительных, безразмерных величин, должны быть указаны единицы измерения.

Вопросы:

1. Что называется газовой постоянной? Как определяется универсальная газовая постоянная? Единицы измерения.
2. Что представляет собой мольная теплоемкость газа? Единицы измерения.
3. Что представляет собой массовая теплоемкость газа?

Таблица 1

Последняя цифра шифра	Компоненты смеси, % по общему			
	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO
1	12	-	74	14
2	10	-	60	30
3	24	-	50	26
4	20	-	52	28
5	32	-	50	18
6	20	5	75	-
7	18	4	78	-
8	14	3	83	-
9	8	10	82	-
0	18	-	72	10

Таблица 2

Показатели	Предпоследняя цифра шифра									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Температура смеси:										
Начальная $t_1, ^\circ\text{C}$	400	600	900	700	1000	100	300	500	800	200
Конечная $t_2, ^\circ\text{C}$	800	1300	1500	1600	2000	500	900	1400	1200	1100

**Задача № 2.** Расчет политропного процесса сжатия газовой смеси. Рабочее тело – газовая смесь, имеющая тот же состав, что и в задаче № 1 (в процентах по объему). Первоначальный объем, занимаемый газовой смесью  $V_1$  (таблица 3). Начальные параметры состояния: давление  $P_1 = 0,1$  МПа, температура  $t_1 = 27^\circ\text{C}$ . Процесс сжатия происходит при показателе политропы  $n$  (таблица 3). Температура смеси в конце сжатия  $t_2 = 327^\circ\text{C}$ .

Определить:

1. Массу газовой смеси;
2. Удельный объем смеси в начале и в конце процесса;
3. Объем, занимаемый смесью в конце процесса;
4. Давление в конце процесса;
5. Работу сжатия в процессе;
6. Изменение внутренней энергии;
7. Массовую теплоемкость рабочего тела в данном процессе;
8. Количество тепла, участвующего в процессе;
9. Изменение энтальпии и энтропии в процессе. Построить рассмотренный процесс в координатах  $P-V$  и  $T-S$ . Считать, что  $C_p \neq f(T)$  и  $C_v \neq f(T)$ . Значения молярных теплоемкостей идеальных газов при  $p = \text{const}$  и  $v = \text{const}$  см. [1, 3]. Газовую постоянную смеси взять из решения задачи №1.

Вопросы:

1. В каких пределах изменяется показатель политропного процесса?
2. В каких пределах изменяется теплоемкость в политропном процессе?
3. Как выглядит уравнение 1-го закона термодинамики для политропного процесса?

Таблица 3

Показатели	Последняя цифра шифра									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Объем смеси $v_1, \text{м}^3$	50	70	90	100	120	5	10	15	25	40
Показатель политропы	1,18	1,15	1,27	1,15	1,35	1,1	1,25	1,2	1,16	1,3

**Задача № 3.** Расчет цикла Карно применительно к тепловому двигателю.

Рабочее тело 1 кг сухого воздуха. Предельные температуры рабочего тела в цикле: наибольшая  $t_1$ , наименьшая  $t_3$  (таблица 4). Предельные давления рабочего тела в цикле: наибольшее  $P_1$  наименьшее  $P_3$  (таблица 5).

Таблица 4

Показатели:	Предпоследняя цифра шифра									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$										
$t_1$	310	260	310	330	270	200	300	250	205	270
$t_3$	25	23	19	25	16	16	18	20	17	21

Таблица 5

Показатели:	Последняя цифра шифра									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Давление, МПа										
$P_1$	4,2	3,5	2,5	4,8	3	2	2,8	3	2,5	4
$P_3$	0,1	0,11	0,13	0,14	0,17	0,16	0,1	0,15	0,12	0,125

Определить:

1. Основные параметры состояния рабочего тела в характерных точках цикла;
2. Количество тепла, подведенное в цикле;
3. Количество тепла, отведенное в цикле;
4. Полезную работу, совершенную рабочим телом за цикл;
5. Изменения энтропии в изометрических процессах цикла.

Построить цикл (в масштабе) в координатах  $P-V$  и  $T-S$ .

Вопросы:

1. Из каких процессов состоит цикл Карно?
2. Что показывает термический КПД цикла теплового двигателя?
3. В какой диаграмме и какой площадью можно проиллюстрировать полезную работу, совершенную рабочим телом в цикле?
4. В какой диаграмме и какой площадью можно проиллюстрировать количество тепла, использованное в цикле или совершения полезной работы?

**Задача № 4.** Расчет процесса адиабатного расширения водяного пара.

Рабочее тело – водяной пар, имеющий в начальном состоянии давление  $P_1$  и температуру  $t_1$  (таблица 6). Масса рабочего тела –  $M$  (таблица 7). Пар расширяется до давления  $P_2$  (таблица 7).

Построить процесс адиабатного расширения водяного пара в диаграмме  $h-S$ .

Таблица 6.

Показатели:	Предпоследняя цифра шифра									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Температура воздуха, $t_1$ °С	520	500	380	430	530	300	400	320	370	450
Давление (абс.) $P_1$ , МПа	7	8	9	10	11	2	3	4	5	6

Определить:

1. Удельный объем и энтальпию пара в начальном состоянии;
2. Температуру, удельный объем, степень сухости и энтальпию пара в конечном состоянии;
3. Значения внутренней энергии пара до и после расширения;
4. Работу расширения пара.

К решению задачи приложить схему построения процесса в координатах.

Таблица 7

Показатели:	Последняя цифра шифра									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Масса $M$ , кг	12	10	15	20	25	5	3	7	8	10
Давление (абс.) $P_2$ , МПа	0,008	0,009	0,010	0,015	0,020	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007

Вопросы:

1. Каковы особенности адиабатного процесса?
2. В каком состоянии водяной пар находится в начале процесса?
3. В какое состояние пар перешел в конце процесса?
4. Каков физический смысл энтальпии водяного пара в данном, конкретном состоянии?

**Задача 5.** Определение скорости истечения водяного пара из сопловых устройств.

Определить теоретическую скорость истечения водяного пара из суживающегося сопла и из сопла Лавалья. Начальные давление и температура пара:  $P_1$  и  $t_1$  (таблица 8). Давление среды, в которую происходит истечение пара,  $P_2$  (таблица 9).

Таблица 8

Показатели:	Последняя цифра шифра									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Давление $P_1$ , МПа	8	10	7	6	4	0,8	1,6	3	3,5	5
Температура воздуха, $t_1$ °С	420	450	370	350	325	220	350	375	390	400

Таблица 9

Показатели:	Предпоследняя цифра шифра									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Давление $P_2$ , МПа	0,003	0,03	0,04	0,008	0,01	0,005	0,01	0,05	0,02	0,04

К расчету приложить изображения адиабатных процессов истечения из сопловых устройств в диаграмме  $h-S$ .

Дать эскизы профилей суживающегося сопла и сопла Лаваля.

Вопросы:

1. При каких условиях возникает критическая скорость истечения газа (пара)?
2. Дать характеристику скорости истечения газа (пара) из суживающегося сопла при  $P_2 > P_{2кр}$
3. Дать характеристику скорости истечения газа (пара) из суживающегося сопла при  $P_2 \leq P_{2кр}$
4. Дать характеристику скорости истечения газа (пара) из сопла Лаваля при  $P_2 < P_2$

**Задача 6.** Для сушки изделий используется воздух при  $t_1$ , °С с относительной влажностью  $\varphi$ , %. В воздушном подогревателе воздух нагревают до  $t_2$ , °С и направляют в сушилку, откуда он выходит при температуре  $t_3$ , °С. Определить конечное влагосодержание воздуха, расход количества теплоты на 1 кг испаренной влаги ( $q = h_3 - h_1$ ). Процесс насыщения влажного воздуха считать идеальным.

Таблица 10

Показатели:	Последняя цифра шифра									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Температура воздуха, $t_1$ , °С	20	25	30	40	50	25	30	20	15	20
Относительная влажность $\varphi$ , %	50	60	65	70	40	55	60	70	80	60
Температура воздуха, $t_2$ , °С	90									
Температура воздуха, $t_3$ , °С	35									

Вопросы:

1. Дать понятие влажного воздуха. Перечислить основные термодинамические параметры, определяющие состояние влажного воздуха.
2. Дать понятие точки росы.
3. В чем состоит практическое значение  $hd$ -диаграммы?

## Список литературы

1. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. – М.: Аз-бук, 2008. – 497 с.
2. Арнольд Л.В., Михайловский Г.А., Селиверстов В.М. Техническая термодинамика и теплопередача. – М.: В.Ш., 1979. – 444 с.
3. Рабинович О.М. Сборник задач по технической термодинамике. – М.: Машиностроение, 1969. – 376 с.
4. Михеев М.А., Михеева Й.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1973. – 344 с.
5. Алексеев Г.Н. Общая теплотехника. – М.: В.Ш., 1980. – 552 с.
6. Лариков Н.Н. Теплотехника. – М.: В.Ш., 1985. – 432 с.
7. Хрусталеv Б.М., Несенчук А.П. Техническая термодинамика. – Минск: УП «Технопринт», 2004. – 486 с.
8. Медведева Г.А., Садыков Р.А. Методические указания по дисциплине «Техническая термодинамика», «Таблицы теплофизических свойств» для студентов направления подготовки 08.03.01 «Строительство» профиля «Теплогазоснабжение и вентиляция» Казань: КГАСУ, 2017. – 49 с.



## ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

Методические указания и  
задания к контрольным работам  
для студентов направления подготовки 08.03.01 «Строительство»  
направленность (профиль) «Теплогазоснабжение, вентиляция,  
водоснабжение и водоотведение зданий, сооружений и населенных  
пунктов»

Составитель:      Медведева Галина Александровна

Редактор:          Рябенкова Г.А.

Редакционно-издательский отдел  
Казанского государственного архитектурно-строительного университета

Подписано в печать

Заказ №

Тираж 50 экз.

Печать ризографическая

Бумага офсетная № I

Формат 60 x 84/16

Усл. печ. л. 1,875

Уч.-изд. л. 1,875

---

Издательство КГАСУ  
420043, Казань, Зелёная, 1.