

## 1. Основные термодинамические параметры и уравнения состояния рабочего тела

Термодинамика – это наука об энергии и ее свойствах, она представляет собой важнейшую отрасль естествознания. Основой термодинамики служат два основных экспериментально установленных закона, называемых иначе первым и вторым началом термодинамики. Термодинамика как самостоятельная наука получила развитие, когда были открыты эти два закона. Первый из них рассматривается как приложение к тепловым явлениям всеобщего закона сохранения и превращения энергии, а второй характеризует направление протекающих в окружающей нас природе процессов.

Термодинамику в зависимости от круга рассматриваемых, вопросов и целей исследования делят на физическую или общую, химическую и техническую. В физической термодинамике даются представления об общих теоретических основах термодинамики и закономерностях превращения энергии в разнообразных физических явлениях, таких, как электрические, магнитные, поверхностные, капиллярные и др. В химической термодинамике изучаются тепловой эффект различных химических реакций, расчет химического равновесия, исследуются свойства растворов и т. п.

Техническая термодинамика изучает применение законов термодинамики к процессам взаимного превращения тепла и работы. При этом, исходя из данных о действительном механизме процесса всегда можно схематизировать каждый из реальных процессов так, чтобы сделать осуществимым полный его термодинамический анализ. Сущность этой схематизации состоит в том, что из совокупности всех участвующих в процессе тел выделяется рабочее тело, т. е. то, при помощи которого осуществляется рассматриваемый процесс, а остальные тела рассматриваются как источники (и поглотители) тепла. Такая совокупность тел, находящихся во взаимодействии, называется термодинамической системой. Важно отметить также, что для определения полезной работы процесса и количества переданного тепла, что составляет главное содержание прикладной части термодинамики, необязательно знать все особенности кинетики реального процесса. Вполне достаточно, чтобы наряду с внешними условиями, в которых протекает процесс, были известны лишь начальные и конечные состояния всех участвующих в процессе тел. При этом для лучшего понимания физического смысла изучаемых процессов термодинамический метод анализа обычно сочетается с молекулярными и статистическими исследованиями.

Процесс преобразования теплоты в работу осуществляется в тепловых двигателях при помощи рабочего тела. Обычно в качестве рабочего тела используются газы и пары, так как они обладают большим коэффициентом теплового расширения и могут при нагревании совершать гораздо большую работу, чем жидкости и твердые тела.

При теоретическом изучении газообразных тел, или, для краткости, газов, обычно принято иметь дело с так называемым идеальным газом, в котором

отсутствуют силы взаимодействия между молекулами, а сами молекулы принимаются за материальные точки, не имеющие объема. В природе нет идеальных газов, но часто встречаются такие состояния реально существующих газов, у которых силы взаимодействия между молекулами и объемы самих молекул чрезвычайно малы. Поэтому, когда применяют термин «идеальный газ», под ним понимают газ, при изучении свойств которого можно пренебречь силами взаимодействия между молекулами и объемом самих молекул.

В теплотехнических расчетах вполне допустимо считать идеальными все газы, с какими приходится иметь дело ( $N_2$ ;  $O_2$ ;  $H_2$  и т.д.), Исключением является водяной пар, который может встречаться в различных состояниях, а именно:

1) когда водяной пар является частью газовых смесей, которые получаются в результате сгорания топлива в различного рода агрегатах. В этом случае парциальное давление пара мало, а температура пара высокая и он далек от состояния жидкости. Такой водяной пар можно считать идеальным газом. По этим же соображениям идеальным газом обычно считают и водяной пар, который как составная часть входит в атмосферный воздух;

2) когда водяной пар является рабочим телом в паровых двигателях или теплоносителем в различных теплообменных аппаратах. В этом случае пренебрегать силами сцепления между молекулами и объемом самих молекул нельзя, так как его состояние близко к состоянию жидкости. В отличие от предыдущего в этом случае водяной пар называется реальным газом, и он уже не подчиняется законам идеальных газов.

Состояние газа характеризуется средними величинами, измеряющими результат действия молекул, образующих газ. Свойства рабочих тел зависят от того, в каких условиях они находятся. Величины, характеризующие состояние рабочих тел, называются параметрами состояния. В случае отсутствия внешних силовых полей, а также при малом их воздействии на рабочее тело основными термодинамическими параметрами, полностью характеризующими его состояние, являются давление, удельный объем и абсолютная температура.

Давление  $p$  представляет собой нормальную составляющую силы, действующей на поверхность, отнесенную к величине площади этой поверхности. В единицах СИ сила измеряется в ньютонах, поверхность – в квадратных метрах, отсюда единица измерения давления –  $\frac{Н}{м^2}$ . Эта единица получила название паскаль (Па). Так как эта единица очень мала, то на практике используются более крупные кратные единицы: килопаскаль ( $1 \text{ кПа} = 10^3 \text{ Па}$ ) или мегапаскаль ( $1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па}$ ). Однако следует помнить, что во все термодинамические соотношения, записанные в СИ, необходимо подставлять давление  $P$ , выраженное в основных единицах, т.е. в паскалях.

Удельный объем  $v$  представляет собой выраженный в кубический метрах объем 1 кг массы газа. В случае замкнутой системы изменение удельного объема обусловлено только изменением ее объема. При этом если удельный объем уменьшается, то система подвергается сжатию. Если удельный объем увеличивается, то система расширяется. Величина, обратная удельному объему,

называется плотностью  $\rho$ . Она представляет собой выраженную в килограммах массу  $1 \text{ м}^3$  газа. Очевидно, что  $v \cdot \rho = 1$

Температура является мерой средней кинетической энергии молекул, т.е. мерой скорости их теплового движения. Чем эта скорость больше, тем выше температура тела. Абсолютная температура, обозначаемая буквой  $T$ , характеризует степень нагретости тела и измеряется в кельвинах (К), на практике применяется так называемая Международная практическая шкала температуры, измерение в которой обычно производится в градусах Цельсия ( $^{\circ}\text{C}$ ). Обозначается эта температура буквой  $t$ . Между температурой, выраженной в кельвинах и в градусах Цельсия, существует следующая связь:

$$T = t + 273,15 \text{ К.}$$

Нужно помнить, что термодинамическим параметром состояния является только абсолютная температура  $T$ .

Параметры состояния равновесной термодинамической системы связаны между собой зависимостью, называемой уравнением состояния. Уравнение состояния для одного килограмма вещества называется уравнением Клайперона:

$$Pv = R_0T,$$

где  $R_0$  – постоянная величина, которая имеет название удельной газовой постоянной, Дж/(кг·К).

Уравнение состояния для одного киломоля вещества называется уравнением Клайперона–Менделеева:

$$PV_{\mu} = \mu R_0T,$$

где  $V_{\mu}$  – объем одного киломоля идеального газа при параметрах  $P$  и  $T$ ;  
 $\mu R_0 = R_{\mu} = 8314,31$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К).

## 2. Основные термодинамические функции

Если рабочее тело поместить в среду, имеющую постоянные температуру  $T$  и давление  $p$ , то по истечении некоторого времени в рабочем теле по всему объему установятся такие же температура и давление, что и в среде. Указанный процесс изменения состояния рабочего тела называют термодинамическим процессом. До тех пор, пока состояние среды не изменится, параметры рабочего тела также не будут меняться. Рабочее тело будет находиться в так называемом термодинамическом равновесии со средой. В неравновесном состоянии параметры по объему рабочего тела будут различны. Следовательно, только в состоянии термодинамического равновесия параметры будут определять состояние всего рабочего тела.

Любое физическое тело, в частности рабочее тело, обладает внутренней энергией. Количество ее не является постоянным. В термодинамике под внутренней энергией рабочего тела понимается сумма всех составляющих энергии тела. Сюда входят кинетическая энергия поступательного движения молекул, кинетическая энергия вращательного движения молекул, энергия колебательного движения атомов в молекуле, потенциальная энергия

взаимодействия молекул. Первые три вида энергии можно объединить одним названием: кинетическая составляющая внутренней энергии, а последнюю назвать потенциальной составляющей. Кинетическая составляющая является функцией только температуры. Потенциальная составляющая, кроме температуры, зависит также от удельного объема, так как зависит от расстояния между молекулами газа. Поскольку в общем случае внутренняя энергия газа является функцией двух основных параметров, а каждому состоянию соответствует вполне определенное их значение, то, следовательно, для каждого состояния газа будет характерна своя однозначная, вполне определенная величина внутренней энергии  $U$ , т.е. иначе говоря,  $U$  – это также функция состояния газа, и разность внутренних энергий для двух каких-либо состояний рабочего тела или системы тел не будет зависеть от того, каким путем рабочее тело или система тел будет переходить из первого состояния во второе. Полную внутреннюю энергию тела принято обозначать буквой  $U$  (Дж), а удельную внутреннюю энергию, отнесенную к 1 кг,  $u$  ( $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ ). Математически разность внутренних энергий для двух состояний рабочего тела вычисляется так:

$$u_2 - u_1 = \Delta u = m\bar{c}_v(T_2 - T_1),$$

где  $\Delta u$  обычно называют изменением внутренней энергии, единица измерения которой, отнесенная к 1 кг газа, будет  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ ;  $T_1$  и  $T_2$  – начальная и конечная температуры в процессе;  $\bar{c}_v$  – средняя удельная изохорная теплоемкость.

В идеальном газе силы сцепления между молекулами отсутствуют, следовательно, нет и потенциальной энергии, которая обусловлена наличием сил сцепления. Поэтому для идеального газа внутренняя энергия представляет собой функцию только температуры газа и только ею и определяется.

При взаимодействии с другими телами внутренняя энергия рабочего тела может уменьшаться или увеличиваться. Это взаимодействие проявляется в двух формах: в форме теплоты путем теплообмена и в форме механической работы. В случае теплообмена теплота может подводиться из внешней среды к рабочему телу или отводиться от него во внешнюю среду, и необходимым условием передачи энергии является наличие разности температур между рабочим телом и средой. Энергия, отведенная в форме тепла (отведенное тепло), считается отрицательной, а энергия, подведенная в форме тепла (подведенное тепло), – положительной. Все тепло, отведенное или подведенное от рабочего тела обозначается  $Q$  (Дж), а отнесенное к 1 кг рабочего тела –  $q$  ( $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ ). В первом случае внутренняя энергия рабочего тела уменьшается, во втором – увеличивается.

Другой формой передачи энергии в термодинамическом процессе является работа. В отличие от тепла передача энергии в этой форме обязательно связана с видимым перемещением тела (в целом или отдельных его частей) и, в частности, с изменением его объема.

Энергию, подведенную к рабочему телу в форме работы, принято называть совершенной над телом работой и считать ее отрицательной. Отведенную энергию в форме работы называют затраченной телом работой и считают ее положительной. Полная работа обозначается буквой  $L$  (Дж), а удельная –  $l$  ( $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ ).

Важно отметить, что при различных условиях протекания процесса соотношение между теплом и работой будет различно, даже если начальные и конечные состояния в процессах будут совпадать. Отсюда следует, что тепло и работа зависят от пути процесса и в отличие от внутренней энергии не являются функциями состояния, а представляют собой функции процесса. Для графического определения работы удобно пользоваться диаграммой, на которой по оси абсцисс откладывают значение удельного объема газа  $v$  в процессе, а по оси ординат – устанавливаемое при этом давление. Если получившиеся на этой диаграмме отдельные точки, каждая из которых характеризует состояние газа, соединить между собой плавной кривой, то получится линия, характеризующая изменение состояния газа. Тогда полная работа расширения или сжатия газа  $L$  будет определяться площадью под кривой. Удельная работа газа при его расширении:

$$l = \int_{v_1}^{v_2} p dv = p(v_2 - v_1).$$

Систем осей координат, называемая  $p, v$ -диаграммой или индикаторной диаграммой, широко используемой в термодинамике для анализа различных процессов изменения состояния газов. Если при изменении состояния газа объем его уменьшается, т.е. совершается сжатие, то при подсчете работа получается отрицательной, так как начальный объем в этом случае будет больше конечного. Физический смысл отрицательной работы состоит в том, что работу совершают внешние силы, приложенные к газу, а не сам газ.

Внутренняя энергия  $U$  характеризует энергетическое состояние частиц, составляющих рабочее тело. Однако для анализа всех термодинамических процессов этого понятия недостаточно, так как необходим параметр, характеризующий потенциальную энергию связи данного рабочего тела с окружающей средой. Таким параметром является энтальпия  $H$ :

$$H = U + pV.$$

Из аналитического определения энтальпии следует, что она складывается из внутренней энергии рабочего тела и величины  $pV$ , которая представляет собой работу, затраченную на то, чтобы ввести тело объемом  $V$  в окружающую среду с давлением  $p$ .

Энтальпия, как и внутренняя энергия, имеет в каждом определенном состоянии, т.е. при определенных параметрах, вполне конкретное и единственное значение, следовательно, энтальпия является функцией состояния, и ее изменение в каком-либо термодинамическом процессе зависит только от параметров тела в начале и конце процесса и не зависит от характера самого процесса. Поскольку в технической термодинамике приходится иметь дело только с изменением

энтальпии, то отсчет ее производится от условного нуля. Обозначается энтальпия для произвольного количества рабочего тела буквой  $H$  (Дж), а для 1 кг – буквой  $h$  ( $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ ). Для 1 кг рабочего тела энтальпия

$$h = u + pv.$$

В теплотехнических расчетах и исследованиях широкое использование получила функция состояния, называемая энтропией от греческого слова *trōpos* (превращение или преобразование). Такое название свидетельствует о том, что эта функция используется для исследования процессов преобразования энергии. Из всей подведенной в круговом процессе теплового двигателя теплоты  $Q_1$  в полезную работу переводится только часть ее, а именно  $|Q_1| - |Q_2|$ . Теплота же  $Q_2$ , передаваемая в теплоприемник, является необходимой потерей, которую, однако, следует стремиться уменьшать. Значение тепловой потери согласно выражению для к.п.д. прямого обратимого цикла зависит от: отношения  $Q_1/T_1$  и термодинамической температуры  $T_2$ . Температура теплоприемника  $T_2$  изменяется обычно в небольших пределах, поэтому теплота  $Q_2$  зависит, главным образом, от отношения  $Q_1/T_1$ : чем оно больше, тем больше потеря теплоты. Отношение  $Q/T$  называется приведенной теплотой или энтропией. В термодинамических расчетах представляет интерес не абсолютное значение энтропии, а лишь ее изменение в процессе, которое зависит только от конечного и начального состояний рабочего тела. Для бесконечно малого участка процесса приведенное тепло примет вид  $\frac{dq}{T} = ds$ .

Изменение энтропии газа в процессе  $\Delta s$  и сама энтропия  $s$  не зависят от характера процесса изменения состояния газа, а определяются только начальным и конечным состояниями рабочего тела, т.е. энтропия  $s$  действительно является функцией состояния. Единицей измерения удельной энтропии служит единица  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ . Так как удельная энтропия является параметром состояния, то она может быть использована для графического изображения термодинамических процессов в так называемой  $T,s$ -диаграмме или тепловой диаграмме, по одной из осей которых откладываются значения удельной энтропии, а по другой оси термодинамической температуры  $T$ . Если линия процесса идет вправо, что указывает на рост, то теплота к рабочему телу подводится. Если же линия процесса идет влево и энтропия уменьшается, то теплота отводится.

### 3. Теплоемкость газов

#### 3.1. Основные определения

Теплоемкость – величина, равная отношению сообщаемой телу или отводимой от него теплоты к соответствующему изменению его температуры:  $C = \frac{Q}{\Delta T}$ ,

где  $C$  – теплоемкость;  $Q$  – подведенная (или отведенная) теплота;  $\Delta T$  – изменение температуры тела.

В теплотехнических расчетах широко используются удельная и молярная теплоемкости.

Массовой теплоемкостью называется отношение теплоемкости тела к его массе:  $c = \frac{C}{m}$ ,

где  $c$  – массовая теплоемкость;  $m$  – масса тела.

Молярной теплоемкостью называется отношение теплоемкости к количеству вещества:  $\mu c = \frac{C}{n}$ ,

где  $\mu c$  – молярная теплоемкость;  $n$  – количество вещества.

Объемной теплоемкостью называется отношение теплоемкости к 1 м<sup>3</sup> газа при нормальных условиях:  $c' = \frac{C}{v_0}$ ,

где  $c'$  – объемная теплоемкость;  $v_0$  – объем газа при нормальных условиях.

Между массовой, объемной и молярной теплоемкостями имеется следующая связь:  $c = c' \cdot v_0 = \frac{\mu c}{\mu}$ ;  $c' = \frac{c}{v_0} = \frac{\mu c}{22,41}$ ;  $\mu c = c \cdot \mu = c' \cdot 22,41$ .

### 3.2. Истинная и средняя теплоемкости

Теплоемкости газов и паров являются переменными величинами; для идеальных газов они зависят от их температуры, а для реальных газов и паров также и от их давления. Поэтому различают теплоемкости истинные и средние. Истинной называется теплоемкость при заданной температуре, а средней – среднее значение теплоемкости в заданном интервале температур, в пределах которых производится подвод или отвод теплоты.

В тепловых расчетах пользуются средними теплоемкостями: удельной и молярной. Средняя удельная теплоемкость вещества равна отношению подведенной теплоты к массе вещества и разности температур в конце и в начале подвода теплоты:  $c_m = \frac{Q_{1,2}}{m(T_2 - T_1)}$ .

Средняя молярная теплоемкость вещества равна отношению подведенной теплоты к количеству вещества и разности температур в конце и в начале подвода теплоты:  $\mu c_m = \frac{Q_{1,2}}{n(T_2 - T_1)}$ . В СИ теплоемкость  $c_m$  измеряется  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ,

молярная теплоемкость  $\mu c_m$  –  $\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ , объемная теплоемкость  $c'$  –  $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$ .

### 3.3. Зависимость теплоемкости от характера процесса

Как было сказано выше, теплоемкость газов в сильной степени зависит от тех условий, при которых происходят процессы их нагревания или охлаждения.

Среди этих процессов в технике наиболее важное значение имеют процессы, протекающие при постоянном объеме газа (изохорный процесс) и при постоянном давлении газа (изобарный процесс). В связи с этим различают теплоемкость при постоянном объеме ( $c_v$  – массовая изохорная теплоемкость,  $\mu c_v$  – молярная изохорная теплоемкость) и теплоемкость при постоянном давлении ( $c_p$  – массовая изобарная теплоемкость,  $\mu c_p$  – молярная изобарная теплоемкость). Количественное соотношение между  $c_p$  и  $c_v$  устанавливают с помощью уравнения Р. Майера:  $c_p - c_v = R_0$  или  $\mu c_p - \mu c_v = R_\mu = 8314,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ , откуда  $\mu c_p = \mu c_v + 8314,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ . Таким образом, разность между молярными изобарной и изохорной теплоемкостями для всех газов есть величина постоянная и равна универсальной газовой постоянной.

### 3.4. Нахождение истинных и средних теплоемкостей

Для нахождения истинной массовой, объемной или молярной теплоемкости используют два способа: графический – по  $c, t$ -диаграмме и табличный – с использованием специальных таблиц.

В  $c, t$ -диаграмме по оси ординат откладываются значения истинной теплоемкости (массовой, объемной или молярной), а по оси абсцисс – температуры.

Пусть истинная удельная теплоемкость на  $c, t$ -диаграмме изображается линией 1-2, которая в общем случае является кривой (рис 3.4.1).

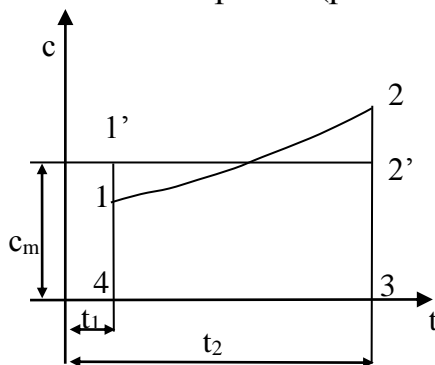


Рис. 3.4.1. Графическое определение средней теплоемкости в заданном интервале температур

Тогда отрезок 4-1 в масштабе будет истинной удельной теплоемкостью при температуре  $t_1$ , а отрезок 3-2 – истинной удельной теплоемкостью при температуре  $t_2$ .

Если заменить площадь 1234 равновеликим ей прямоугольником 1'2'34 с основанием 4-3, то высота его 4-1' (или 3-2') и будет представлять в масштабе среднюю удельную теплоемкость  $c$  в процессе 1-2.

Площадь этого прямоугольника равна произведению высоты на основание или в данном случае произведению:  $A = c_m(t_2 - t_1)$ .

Умножим правую и левую части уравнения для средней массовой теплоемкости на разность температур  $(T_2 - T_1)$ , получим:  $q_{1,2} = c_m(T_2 - T_1)$

Сопоставляя правые части последних уравнений, видим, что они равны, поэтому пл. 1234, равновеликая пл. 1'2'34, определяет в масштабе удельную подведенную (или отведенную) теплоту.

Следовательно, на  $c, t$ -диаграмме площадь, ограниченная линией истинной удельной теплоемкости, крайними ординатами этой линии и осью абсцисс, определяет в масштабе удельное количество подведенной или отведенной теплоты.

Задача определения средней удельной теплоемкости в заданном процессе значительно упрощается, если линию истинной теплоемкости представить в виде прямой (рис. ).

В этом случае средняя удельная теплоемкость в интервале температур  $t_1-t_2$  может быть принята как среднеарифметическая между истинными теплоемкостями  $c_1$  (при температуре  $t_1$ ) и  $c_2$  (при температуре  $t_2$ ) (рис.3.4.2, а), т. е.

$$c_m = \frac{(c_1 + c_2)}{2}.$$

Задача нахождения средней удельной теплоемкости (в случае прямолинейной зависимости теплоемкости от температуры) может быть еще упрощена, если в качестве ее взять истинную удельную теплоемкость при среднеарифметической температуре процесса, т.е. при температуре  $t_m = \frac{(t_1 + t_2)}{2}$  (рис. 3.4.2, б).

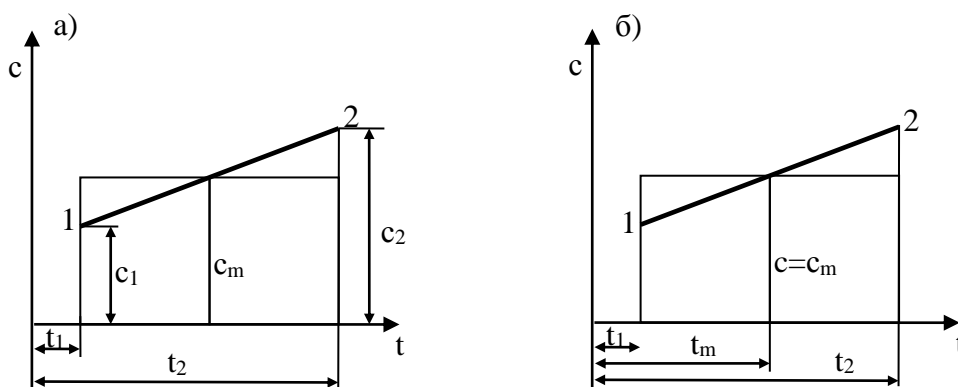


Рис. 3.4.2. Определение средней теплоемкости в заданном интервале температур упрощенным способом

Замена криволинейной зависимости теплоемкости от температуры прямолинейной зависимостью вносит некоторую неточность в расчеты, однако незначительную, и поэтому часто ею можно пренебречь.

Нахождение теплоемкостей табличным способом производится с помощью таблиц молярных или удельных теплоемкостей.

В таблице 3 приложения приведены истинные массовые теплоемкости, часто встречающиеся в тепловых расчетах воздуха и отдельных газов.

#### 4. Газовые смеси

Под газовой смесью мы понимаем смесь идеальных газов, не вступающих в химическое взаимодействие.

На практике со смесями приходится иметь дело довольно часто. При этом параметры смеси бывают таковы, что к ним с достаточной степенью точности применимы все зависимости, справедливые для смесей идеальных газов. Так, например, уходящие газы котельных установок, рабочие тела двигателей внутреннего сгорания, газотурбинных установок и ряда других, а также воздух являются такими смесями газов.

#### 4.1. Смеси идеальных газов

Каждый отдельный газ, входящий в смесь, называют компонентом газовой смеси. Любой компонент ведет себя как бы независимо от других газов, т. е. занимает полный объем смеси и оказывает на стенки сосуда свое давление, называемое парциальным давлением.

Закон Дальтона справедлив только для идеальных газов и формулируется так: давление смеси газов равно сумме парциальных давлений газов, составляющих

$$\text{смесь: } p = p_1 + p_2 + \dots + p_m = \sum_1^n p_i,$$

где  $p_1, p_2, \dots, p_m$  – парциальные давления газов.

Следовательно, парциальным давлением газа называется такое давление, которое имел бы данный газ, входящий в смесь, если бы он один занимал весь объем смеси газов при температуре смеси.

При расчете газовой смеси обычно определяют молярную массу, удельную газовую постоянную, плотность, теплоемкости, парциальное давление и объем компонентов, образующих смесь. Для того чтобы это сделать нужно знать, из какого количества и каких газов состоит газовая смесь, т. е. необходимо задать эту смесь по составу. Состав смеси газов может быть задан массовыми или объемными долями.

Массовой долей называют отношение массы данного газа (компонента), входящего в смесь, к массе смеси газов. Обозначается массовая доля буквой  $g$ :

$$g_1 = \frac{M_1}{M_{\text{см}}}; g_2 = \frac{M_2}{M_{\text{см}}}; g_n = \frac{M_n}{M_{\text{см}}};$$

где  $g_1, g_2, \dots, g_n$  – массовые доли отдельных газов в смеси;  $M_1, M_2, M_n$  – массы этих газов;  $M_{\text{см}}$  – масса смеси;  $n$  – число компонентов в смеси.

$$\text{Из приведенных соотношений очевидно: } g = g_1 + g_2 + \dots + g_m = \sum_1^n g_i = 1,$$

т. е. сумма всех массовых долей равна единице.

*Объемной долей* называют отношение парциального (приведенного) объема газа, входящего в смесь, к объему смеси. Парциальным объемом газа называют объем, который занимал бы данный газ, если бы его температура и давление равнялись температуре и давлению смеси газов. Сумма парциальных объемов равна объему смеси газов. Обозначается объемная доля буквой  $r$ .

$$r_1 = \frac{V_1}{V_{\text{см}}}; r_2 = \frac{V_2}{V_{\text{см}}}; r_n = \frac{V_n}{V_{\text{см}}};$$

где  $r_1, r_2, r_n$  – объемные,  $V_1, V_2, V_n$  – парциальные объемы газов, входящих в смесь;  $V_{см}$  – объем смеси газов. Тогда из соотношений следует:

$r = r_1 + r_2 + \dots + r_n = \sum_1^n r_i = 1$ . Сумма всех объемных долей равна единице.

Соотношение для  $i$ -того компонента газовой смеси можно задать следующим образом:  $g_i = \frac{m_i}{m} = \frac{\rho_i V_i}{\rho V}$ , поскольку плотность  $i$ -го компонента и смеси газов берутся при одинаковых  $P$  и  $T$ , отношения этих плотностей на основании следствия из закона Авогадро. Можно заменить отношением молекулярных масс

или же обратным отношением газовых постоянных. Тогда  $g_i = \frac{\mu_i}{\mu_{см}} r_i = \frac{R_{см}}{R_i} r_i$ ;

$$r_i = \frac{\mu_{см}}{\mu_i} g_i = \frac{R_i}{R_{см}} g_i.$$

Определим кажущуюся молекулярную массу смеси газов:

$$\sum r_i = 1; r_i = \frac{\mu_{см}}{\mu_i} g_i \Rightarrow \sum \frac{\mu_{см}}{\mu_i} g_i = 1; 1 = \mu_{см} \sum \frac{g_i}{\mu_i} \Rightarrow \mu_{см} = \frac{1}{\sum \frac{g_i}{\mu_i}};$$

$$\sum g_i = 1; g_i = \frac{\mu_i}{\mu_{см}} r_i; \Rightarrow \mu_{см} = \sum \mu_i r_i. \text{ Из з-на Авогадро следует, что при}$$

одинаковых давлениях и температурах плотности прямо пропорциональны молекулярным

$$\text{массам: } \frac{\rho_i}{\rho_{см}} = \frac{\mu_i}{\mu_{см}}; \Rightarrow \rho_{см} = \sum \rho_i \cdot r_i; \Rightarrow \sum r_i = \frac{\sum R_i \cdot g_i}{R_{см}} = 1; \Rightarrow R_{см} = \sum g_i R_i. \text{ Т.е.}$$

газовая постоянная смеси газов равна сумме произведений массовой доли каждого газа на его газовую постоянную, т.к.  $R_{см} = \frac{8314,31}{\mu_{см}}$ . Из выше

$$\text{приведенных соотношений: } g_i = \frac{\mu_i r_i}{\sum \mu_i r_i}; r_i = \frac{\frac{g_i}{\mu_i}}{\sum \frac{g_i}{\mu_i}}.$$

Смешение газов при  $T = \text{const}$  характеризуется равенством  $P_{см} \cdot V_i = P_i \cdot V_{см}$  или  $P_i = P_{см} \cdot r_i$ . Т.о. парциальное давление газа входящего в смесь, равно произведению давления смеси на объемную долю данного газа или через массовые доли

$$P_i = P_{см} \frac{\mu_{см}}{\mu_i} g_i, \text{ т.е. парциальное давление газа, входящего в смесь, равно}$$

произведению давления смеси на отношение молекулярных масс смеси и данного газа и на массовую долю газа.

Вид расчетных формул для теплоемкости смеси идеальных газов зависит от способа задания состава газовой смеси.

Если состав смеси задан массовыми долями компонентов, то массовая теплоемкость смеси, определяется как сумма произведений массовых долей на массовую теплоемкость газов, входящих в смесь:

$$c_{\text{см}} = g_1 c_1 + g_2 c_2 + \dots + g_n c_n = \sum_1^n g_i c_i .$$

Если смесь задана объемными долями компонентов, то объемная теплоемкость смеси газов будет равна сумме произведений объемных долей на объемную теплоемкость каждого из компонентов смеси:

$$c'_{\text{см}} = r_1 c'_1 + r_2 c'_2 + \dots + r_n c'_n = \sum_1^n r_i c'_i .$$

#### 4.2. Смеси реальных газов

Реальным газом называется такой газ, у которого между молекулами существуют силы сцепления и объем, занимаемый молекулами, имеет конечное значение. При малых давлениях и высоких температурах реальный газ близок по своим свойствам к идеальному газу. При больших давлениях и низких температурах поведение реального газа не может быть описано закономерностями, справедливыми для идеальных газов. Получение точного уравнения состояния реального газа – проблема, которая полностью не решена до сих пор. Одним из первых уравнений характеризующих состояние реального газа является уравнение, предложенное в 1873 г. голландским физиком Ван-дер-Ваальсом. При выводе своего уравнения Ван-дер-Ваальс попытался учесть влияние сил взаимодействия между молекулами реального газа и конечность объема его молекул. Это уравнение имеет вид:  $(p + \frac{a}{v^2})(v - b) = RT$ , где  $a$  и  $b$  – коэффициенты, зависящие от природы газа;  $\frac{a}{v^2}$ , называемый внутренним давлением, учитывает наличие сил сцепления между молекулами реального газа; коэффициент  $b$  характеризует конечность объема самих молекул. В силу того, что Ван-дер-Ваальс не учитывал всех особенностей взаимодействия молекул реального газа, его уравнение является лишь качественно верным.

Советскими учеными М.П. Вукаловичем и И.И. Новиковым в 1939 г. было получено уравнение для реальных газов с учетом ассоциации и диссоциации их молекул. В общем виде это уравнение записывается в следующей форме:  $pv = RT(1 - A\frac{1}{v} - B\frac{1}{v^2})$ . Коэффициенты  $A$  и  $B$  определяются из равенства:

$$A = \frac{a}{RT} - b + \frac{cR}{T^2} ;$$

$$B = \frac{bcR}{T^2} - 4 \left( 1 - \frac{k}{T} \frac{3m_2 - 4m_1}{2} \right) \left( 1 + \frac{8b}{v} - \frac{n}{v^2} \right) \left( \frac{cR}{T^2} \right)^2 .$$

где  $m_1, m_2, c, k, n$  – коэффициенты, характеризующие степень ассоциации.

Приведенные уравнения можно применять к любому реальному газу. Но в связи с тем что практически использовать эти уравнения трудно из-за сложности, с их помощью вычислены значения основных физических величин перегретого пара при различных  $p$  и  $T$ , составлены таблицы и построена диаграмма в  $h,s$ -координатах, на основании чего и проводятся расчеты процессов изменения состояния водяного пара.

#### 4.2.1. Водяной пар

Среди реальных газов особое место занимает водяной пар. Он получил весьма широкое распространение во многих областях техники и используется в качестве теплоносителя в энергетических установках. Водяной пар обычно используется при таких давлениях и температурах, когда его необходимо рассматривать как реальный газ. Получить водяной пар можно двумя способами: при испарении и кипении воды.

Испарением называется процесс образования пара из воды, происходящий только со свободной поверхности. Этот процесс протекает при любой температуре. При испарении с поверхности воды отрываются молекулы, имеющие наибольшую кинетическую энергию, и вылетают в окружающее пространство. В результате над жидкостью образуется водяной пар. Интенсивность процесса испарения возрастает при повышении температуры.

Кипение – это процесс образования водяного пара во всем объеме жидкости. При нагревании до определенной температуры внутри жидкости образуются пузырьки пара, которые, соединяясь между собой, вылетают в окружающее пространство. Для того, чтобы пузырек пара мог образоваться и затем расти, необходимо, чтобы процесс парообразования происходил внутри пузырьков, а это возможно только, если кинетическая энергия молекул воды имеет достаточную для этого величину. Так как кинетическая энергия молекул определяется температурой жидкости, следовательно, кипение при данном внешнем давлении может начаться только при вполне определенной температуре. Такая температура называется температурой кипения или температурой насыщения и обозначается  $t_n$ . Температура кипения при данном давлении остается постоянной, пока вся жидкость не превратится в пар.

Пар, образующийся над поверхностью кипящей жидкости, называется насыщенным паром. Насыщенный пар может быть сухим или влажным. Сухим насыщенным паром называется такой пар, который, находясь над поверхностью кипящей жидкости, не содержит взвешенных капелек жидкости. Влажным насыщенным паром, или просто влажным паром, называется механическая смесь сухого насыщенного пара и кипящей жидкости. Характеристикой влажного пара является его степень сухости  $x$ . Степенью сухости называется доля сухого насыщенного пара во влажном паре, т.е. отношение массы сухого насыщенного пара во влажном паре к массе влажного пара. Величина  $1-x$  называется степенью влажности или влажностью влажного насыщенного пара, т.е. массовая доля кипящей жидкости во влажном воздухе. Параметрами, полностью

определяющими состояние сухого насыщенного пара или кипящей жидкости, являются температура или давление и степень сухости.

Если к сухому насыщенному пару при отсутствии кипящей жидкости подводить тепло при том же давлении, что и давление сухого насыщенного пара, то он будет переходить в перегретый пар. Температура его начнет повышаться. Перегретым паром называется пар, имеющий более высокую температуру при данном давлении, чем сухой насыщенный пар. Температура перегретого пара обозначается буквой  $t$ , а разность температур  $t - t_n$  называют степенью перегрева, или перегревом пара. С ростом перегрева пара его объем будет увеличиваться, будет расти расстояние между молекулами и, следовательно, уменьшаться силы взаимного притяжения, т.е. перегретый пар при высоких степенях перегрева будет приближаться по своим свойствам к идеальному газу. Параметрами, определяющими состояние перегретого пара, будут давление и температура (или удельный объем).

Процесс, обратный парообразованию, т.е. процесс перехода пара в жидкость, называется процессом конденсации.

Процесс получения перегретого пара можно разбить на три стадии:

- 1) подогрев воды до температуры кипения;
- 2) испарение кипящей воды и образование сухого насыщенного пара;
- 3) перегрев сухого насыщенного пара.

При этом состояние сухого насыщенного пара будет крайне неустойчивым, так как совершенно незначительное увеличение или уменьшение температуры вызовет перегрев пара либо его конденсацию.

#### 4.2.2. Влажный воздух

Атмосферный воздух, состоящий из кислорода, азота, углекислого газа и небольшого количества инертных газов, всегда содержит некоторое количество водяного пара. Механическая смесь сухого воздуха с водяным паром называется влажным воздухом или воздушно-паровой смесью.

К влажному воздуху с достаточной для технических расчетов точностью может быть отнесено все, что касается смесей идеальных газов.

Так как влажный пар находится в воздухе большей частью в перегретом состоянии при незначительных парциальных давлениях, и поэтому близок по свойствам к идеальным газам. В то же время следует подчеркнуть, что влажный воздух нужно рассматривать как разновидность газовой смеси, объясняется тем, что при атмосферном давлении в интервале температур, ограниченном снизу температурой обычно не ниже  $-50$  °С, сухой воздух может быть только в газообразном состоянии, тогда как вода встречается в виде пара, жидкости, или твердой фазы, в зависимости от температуры смеси, и может выпадать из смеси. Поэтому количество водяного пара в смеси с сухим воздухом не может превышать определенной величины. В этом и состоит принципиальное отличие влажного воздуха от обычных газовых смесей. В технике с влажным воздухом приходится иметь дело при расчетах вентиляции, систем для кондиционирования воздуха, и особенно широко при расчетах процессов, протекающих в сушильных

установках. Особенно широкое распространение процесс сушки как вид тепловой обработки получил в промышленности строительных материалов. Скорость процесса сушки или интенсивность удаления влаги не может быть произвольно большой, но не должна быть слишком малой. В первом случае быстрое испарение влаги из изделий приводит к их разрушению при сушке, и, как следствие, к массовому браку. Во втором случае – необоснованная затыжка. Процесс сушки вызывает снижение производительности предприятия и резкое увеличение стоимости продукции, поэтому технологические процессы должны основываться на строго научных положениях, вытекающих из теории сушки. Наибольшее распространение на практике получили сушилки, у которых в качестве тепловлагодонителя или сушильного агента используется нагретый воздух или смесь его с дымовыми газами, которые в условиях непосредственного соприкосновения с высушиваемым материалом воспринимает удаляемую из него влагу.

Одними из основных характеристик влажного воздуха является относительная и абсолютная влажность. Абсолютной влажностью называется количество водяных паров, находящихся в  $1 \text{ м}^3$  влажного воздуха. Абсолютная влажность равна плотности пара, при его парциальном давлении и температуре воздуха, и обозначается  $\rho_n$ . Отношение абсолютной влажности ненасыщенного воздуха при данной температуре к абсолютной влажности насыщенного воздуха при той же температуре называется относительной влажностью  $\varphi$ : 
$$\varphi = \frac{\rho_n}{\rho_n}$$

Для насыщенного воздуха  $\varphi = 1$ , или 100%, а для ненасыщенного влажного воздуха  $\varphi < 1$ . Помимо температуры, абсолютной и относительной влажности, к характеристикам влажного воздуха относятся плотность, молекулярная масса, газовая постоянная, удельный объем, влагосодержание, теплоемкость и энтальпия.

Плотность влажного воздуха складывается из масс, содержащихся в  $1 \text{ м}^3$  сухого воздуха и водяных паров: 
$$\rho = \rho_v + \rho_n = \frac{P_v}{R_v T} + \varphi \cdot \rho_n$$

Молекулярную массу влажного воздуха определяют на основании формул, касающихся смеси газов  $\mu_{см} = \sum_1^n r_i \mu_i$ ;  $r = r_i \cdot p_{см}$ , и если подставить значения для

воздуха и пара, получается расчетная формула: 
$$\mu = 28,95 - 10,934\varphi \frac{P_n}{B}$$
,

где значения  $\rho_n$  при температуре  $T$  берутся по таблице для водяного пара,  $\varphi$  – по данным психрометра,  $B$ , который является барометрическим давлением – по барометру. Полученная формула показывает, что относительная молекулярная масса влажного воздуха меньше сухого, то есть влажный воздух легче сухого.

Поскольку в процессе сушки влажность непрерывно увеличивается, а количество сухого воздуха в паровоздушной смеси остается постоянным, то процесс сушки судят по тому, как изменяется количество водяного пара на  $1 \text{ кг}$

сухого воздуха и все показатели паро-воздушной смеси относят к 1 кг сухого воздуха, находящегося во влажном.

Влагосодержание влажного воздуха представляет собой отношение массы пара к массе сухого воздуха, содержащегося в паровоздушной смеси:  $d = \frac{m_n}{m_b}$ ,

где  $m_n$  – масса пара,  $m_b$  – масса сухого воздуха во влажном воздухе.

$$d = \frac{g_n}{g_b} = \frac{\mu_n r_n}{\mu_b r_b} = \frac{18,016}{28,95} \cdot \frac{p_n}{p_b} = 0,622 \frac{p_n}{p_b} = 0,622 \frac{\varphi \cdot p_n}{B - \varphi \cdot p_n}.$$

Таким образом, влагосодержание  $d$  при постоянном барометрическом давлении  $B$ , полностью определяется парциальным давлением пара, где  $p_n = \varphi \cdot p_n$ , и не зависит от температуры воздуха.

Максимально возможное содержание влаги в воздухе будет при  $\varphi=1$ :

$$d_{\max} = d_n = 0,622 \frac{p_n}{B - p_n}.$$

Так как  $p_n$  растет с температурой, то максимальное количество влаги, которое может содержаться в воздухе, зависит от его температуры; тем больше, чем она выше:

$$\frac{d}{d_n} = \varphi \frac{B - p_n}{B - \varphi \cdot p_n} = \psi \text{ — называется степенью насыщенности влажного}$$

воздуха.

При относительной влажности, близкой к 1, значение степени насыщенности и относительной влажности равны:  $\varphi = \frac{p_n}{p_n} = \frac{d(0,622 + d_n)}{d_n(0,622 + d)} = \psi \frac{0,622 + d_n}{0,622 + d}$ .

Газовую постоянную  $R$  влажного воздуха можно определить из соотношения

$$R = \frac{8,314}{\mu} \text{ или } R_{\text{см}} = \sum_1^n g_i R_i, \text{ получим: } R = \frac{8,314}{28,95 + 10,934 \cdot \varphi \cdot \frac{p_n}{B}}; .$$

$$R_{\text{вл.в}} = g_b R_b + g_n R_n = \frac{8,314}{28,95} + d \frac{8,314}{18,016} ..$$

Удельный объем влажного воздуха можно определить, разделив объем влажного воздуха, приходящийся на 1 кг сухого воздуха, на его массу:  $V = \frac{V_{\text{вл.в.}}}{1 + d}$ .

Удельную массовую теплоемкость паровоздушной смеси, отнесенную к 1 кг сухого воздуха, определяем:  $c_{\text{см}} = \sum_1^n g_i c_i = c_b + d \cdot c_n$ .

Теплоемкость сухого воздуха при постоянном давлении и небольших интервалах температур (до  $100^\circ$ ) для приближенных расчетов можно считать постоянной величиной, равной  $1,0048 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ . Для перегретого пара средняя

изобарная теплоемкость при атмосферном давлении и невысоких степенях перегрева может быть принята также постоянной и равной  $1,96 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ .

Энтальпия влажного воздуха широко используется при расчетах сушильных установок, главным образом для определения тепла, расходуемого на испарение влаги из подсушиваемых материалов. Энтальпию влажного воздуха относят к 1 кг сухого воздуха в паровоздушной смеси, и определяют как сумму энтальпий сухого воздуха и водяного пара:  $h_{\text{вл.в}} = h_{\text{в}} + d \cdot h_{\text{п}}$ .

При расчетах энтальпий смеси начальная точка отсчета энтальпий каждой из компонентов должна быть одной и той же.

#### 4.2.3. $h, d$ – диаграмма влажного воздуха

На  $h, d$ -диаграмме, по оси ординат откладываются значения удельных энтальпий влажного пара  $h$ , а по оси абсцисс — значения массового отношения водяных паров к воздуху  $d$ .

Для удобного взаимного расположения линий, наносимых на  $h, d$ -диаграмму, она строится в косоугольных координатах, в которых ось абсцисс проводится под углом  $135^\circ$  к оси ординат, что дает возможность сделать эту диаграмму компактной.

При таком взаимном расположении осей координат линии постоянных значений удельной энтальпии ( $h = \text{const}$ ), которые должны быть параллельны оси абсцисс, идут наклонно. Однако чтобы удобнее было производить на диаграмме отсчеты, из начала координат проводится горизонталь, на которую спроектированы значения удельной энтальпии  $h_1, h_2, h_3, \dots$ . При этом линии постоянных значений массовых отношений  $d_1, d_2, d_3, \dots$  идут в виде прямых, параллельных оси ординат, т. е. вертикально.

Кроме того, на  $h, d$ -диаграмме наносят изотермы  $t_1, t_2, t_3, \dots$  и линии постоянных значений относительной концентрации водяных паров в воздухе  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots$  (начиная от  $\varphi = 5\%$  до  $\varphi = 100\%$ ). Эти линии строят только до изотермы  $100^\circ \text{C}$ , т.е. до тех пор, пока парциальное давление пара в воздухе  $P_{\text{п}}$  меньше атмосферного давления  $P_{\text{а}}$ . В тот момент, когда  $P_{\text{п}}$  станет равным  $P_{\text{а}}$ , эти линии теряют физический смысл.

Кривая постоянного относительного значения  $\varphi = 100\%$  делит всю диаграмму на две части. Та ее часть, которая расположена выше этой линии, — это область ненасыщенного влажного воздуха, в которой пар находится в перегретом состоянии. Часть диаграммы ниже линии  $\varphi = 100\%$  — область насыщенного влажного воздуха.

Кроме перечисленных линий в верхней части диаграммы (над линией  $\varphi=100\%$ ) проведены еще линии постоянных истинных температур мокрого термометра  $t_{\text{м},1}, t_{\text{м},2}, t_{\text{м},3}, \dots$  используемые в расчетах, связанных с процессами сушки в закрытых помещениях. Если процесс сушки производится нагретым воздухом, то относительная концентрация его при этом повышается вследствие испаренной влаги. Если внутреннее пространство сушильной камеры изолировано от

теплого воздействия внешней среды, то теплота, необходимая для испарения, может быть получена только за счет уменьшения внутренней энергии воздуха, находящегося в камере. Такой процесс сушки может рассматриваться как адиабатный.

Если его вести до полного насыщения воздуха, т. е. линию этого процесса на  $h,d$ -диаграмме довести до пограничной кривой  $\phi = 100\%$ , то температура воздуха, состояние которого определяется этой точкой, будет температурой адиабатного насыщения, или истинной температурой мокрого термометра, имеющегося в психрометрах – приборах для определения относительной концентрации водяных паров в воздухе.

В таких приборах устанавливаются два одинаковых термометра, но у одного из них шарик свободно омывается окружающим воздухом и поэтому показывает температуру этого воздуха, не насыщенного водяными парами, а шарик другого, мокрого термометра обернут влажной тканью, обеспечивающей постоянный приток к шарикку влаги. В таких условиях мокрый термометр показывает температуру не окружающего его воздуха, которая в адиабатном процессе испарения изменяется, а температуру насыщения воздуха, которая в процессе испарения остается постоянной и притом ниже температуры сухого термометра.

По мере выпаривания влаги воздух все больше насыщается парами воды, температура его понижается, и, наконец, когда влажность станет максимальной (т. е. когда линия процесса дойдет до пограничной кривой  $\phi = 100\%$ ), температура сухого термометра понизится до истинной температуры мокрого термометра и станет определяться изотермой, т. е. изотермой  $t_{m,s}$ .

Истинная температура мокрого термометра всегда несколько ниже показываемой этим термометром, что объясняется тем, что достичь полной адиабатности процесса выпаривания не удастся из-за проникновения в сушильную камеру теплоты извне и теплового воздействия на шарик мокрого термометра предметов, находящихся в камере. Для уменьшения влияния такого воздействия мокрый термометр обдувается сильной струей воздуха от вентилятора и, кроме того, защищается экраном. Тем не менее в показания мокрого термометра нужно вносить поправку на выступающий столбик ртути, подсчитываемую по специальной формуле. Таким образом получается значение истинной температуры мокрого термометра.

При построении на  $h,d$ -диаграмме линий  $t_m = \text{const}$  эта поправка учтена и температуры, определяемые с помощью этих линий, являются истинными температурами мокрого термометра.

Рассмотрим некоторые задачи, решаемые по  $h,d$ -диаграмме.

Подогрев. Поскольку в этом процессе массовая концентрация влаги в воздухе  $d$  остается постоянной, линия этого процесса должна идти вертикально вверх.

Испарение. Если считать удельную энтальпию жидкости(воды) равной нулю, то теплота, взятая из воздуха для испарения влаги, вернется в воздух вместе с выпаренной влагой. Таким образом, в этом процессе удельная энтальпия не изменится. Следовательно, процесс испарения идет по линии  $h = \text{const}$ .

Адиабатное испарение (в ограниченном объеме), как уже говорилось, идет по линии  $t_m = \text{const}$ .

Нахождение точки росы. Определив по двум параметрам состояние заданного воздуха, нужно провести от нее вертикаль до пограничной кривой  $\varphi=100\%$ . Тогда изотерма  $t_2$ , на которой лежит точка, определит температуру точки росы воздуха заданного состава.

## 5. Задания для курсовой работы

### 5.1. Расчет смеси идеальных газов

Условия 25 заданий приведены в табл. 1 приложения. Условия индивидуального задания берутся в соответствии с вариантом (графа 1).

Газовая смесь по составу задана либо массовых либо в объемных долях (в зависимости от варианта) (графа 2, табл.1, приложения), процентным составом компонентов смеси (графа 3–9, табл.1, приложения) при заданных условиях: давление смеси  $P_{см}$  (графа10, табл.1, приложения), объем смеси  $V_{см}$  (графа 11, табл.1, приложения), температура смеси  $T_{см}$  (графа 12, табл.1, приложения).

Требуется произвести расчет газовой смеси по законам и аналитическим зависимостям идеального газа.

1. Определить основные параметры газовой смеси и ее компонентов при заданных условиях. Полученные результаты внести в табл.5.1.1.

Таблица 5.1.1

Газы	r	g	$\mu, \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$	$R, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	M, кг	P, кПа	$V, \text{м}^3$	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$V_{H_2}, \text{м}^3$	$\rho_{H_2}, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
смесь										

2. Определить параметры состояния газовой смеси и ее компонентов при нормальных условиях. Полученные результаты внести в табл.5.1.1.

3. Определить истинные удельные теплоемкости смеси газов при заданных условиях.

4. Определить количество теплоты необходимо затратить, чтобы изменить температуру смеси газов в заданном интервале температур (графа13, табл.1, приложения) в изобарном и изохорном процессах 2 молей,  $5 \text{ м}^3$  и 7 кг смеси.

Пример расчета

Вариант 0.

Газовая смесь в объемных долях имеет следующий состав:

$$\text{CO}_2 = 15\%; \quad \text{N}_2 = 75\%;$$

$$\text{H}_2\text{O} = 5\%; \quad \text{O}_2 = 5\%;$$

$$P_{см} = 1,25 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$V_{\text{см}} = 5 \text{ м}^3;$$

$$T_{\text{см}} = 700 \text{ }^\circ\text{C};$$

Заданный интервал температур: 300...1300 °С.

Решение:

Определим основные параметры газовой смеси и ее компонентов при заданных условиях. По условию газовая смесь задана объемными долями, следовательно необходимо определить массовые доли компонентов в газовой смеси:

$$g_i = \frac{r_i \cdot \mu_i}{\sum \mu_i \cdot r_i};$$

$$\mu_{\text{N}_2} = 44,01 \cdot 10^{-3} \frac{\text{КГ}}{\text{МОЛЬ}} = 44,01 \frac{\text{КГ}}{\text{КМОЛЬ}}; \quad \mu_{\text{N}_2} = 28,013 \cdot 10^{-3} \frac{\text{КГ}}{\text{МОЛЬ}} = 28,013 \frac{\text{КГ}}{\text{КМОЛЬ}};$$

$$\mu_{\text{H}_2\text{O}} = 18,014 \cdot 10^{-3} \frac{\text{КГ}}{\text{МОЛЬ}} = 18,014 \frac{\text{КГ}}{\text{КМОЛЬ}}; \quad \mu_{\text{O}_2} = 32 \cdot 10^{-3} \frac{\text{КГ}}{\text{МОЛЬ}} = 32 \frac{\text{КГ}}{\text{КМОЛЬ}};$$

$$g_{\text{CO}_2} = \frac{0,15 \cdot 44,01 \cdot 10^{-3}}{0,15 \cdot 44,01 \cdot 10^{-3} + 0,75 \cdot 28,013 \cdot 10^{-3} + 0,05 \cdot 18,014 \cdot 10^{-3} + 0,05 \cdot 32 \cdot 10^{-3}} =$$
$$= \frac{6,6015}{30,122} = 0,219;$$

$$g_{\text{N}_2} = \frac{0,75 \cdot 28,013 \cdot 10^{-3}}{0,15 \cdot 44,01 \cdot 10^{-3} + 0,75 \cdot 28,013 \cdot 10^{-3} + 0,05 \cdot 18,014 \cdot 10^{-3} + 0,05 \cdot 32 \cdot 10^{-3}} =$$
$$= \frac{21,0195}{30,122} = 0,698;$$

$$g_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{0,05 \cdot 18,014 \cdot 10^{-3}}{0,15 \cdot 44,01 \cdot 10^{-3} + 0,75 \cdot 28,013 \cdot 10^{-3} + 0,05 \cdot 18,014 \cdot 10^{-3} + 0,05 \cdot 32 \cdot 10^{-3}} =$$
$$= \frac{0,9007}{30,122} = 0,03;$$

$$g_{\text{O}_2} = \frac{0,05 \cdot 32 \cdot 10^{-3}}{0,15 \cdot 44,01 \cdot 10^{-3} + 0,75 \cdot 28,013 \cdot 10^{-3} + 0,05 \cdot 18,014 \cdot 10^{-3} + 0,05 \cdot 32 \cdot 10^{-3}} =$$
$$= \frac{1,6}{30,122} = 0,053;$$

$$\text{Проверка: } \sum g_i = 0,219 + 0,698 + 0,03 + 0,053 = 1$$

$$\text{Определим удельную газовую постоянную смеси: } R_{\text{см}} = \sum g_i \cdot R_i;$$

$$R_{\text{см}} = 0,219 \cdot 0,189 + 0,698 \cdot 0,297 + 0,03 \cdot 0,461 + 0,053 \cdot 0,26 = 0,276 \frac{\text{КДЖ}}{\text{КГ} \cdot \text{К}};$$

Определим молярную массу газовой смеси через объемные доли:

$$\mu_{\text{см}} = \sum r_i \cdot \mu_i;$$

$$\mu_{\text{см}} = 0,15 \cdot 44,01 \cdot 10^{-3} + 0,75 \cdot 28,013 \cdot 10^{-3} + 0,05 \cdot 18,014 \cdot 10^{-3} + 0,05 \cdot 32 \cdot 10^{-3} =$$

$$= 30,122 \cdot 10^{-3} \frac{\text{КГ}}{\text{МОЛЬ}} = 30,122 \frac{\text{КГ}}{\text{КМОЛЬ}}; \quad \text{Проверка: } \mu_{\text{см}} = \frac{R_{\mu}}{R_{\text{см}}} = \frac{8,314}{0,276} = 30,123 \frac{\text{КГ}}{\text{КМОЛЬ}};$$

Определим молярную массу газовой смеси через массовые доли:  $\mu_{\text{см}} = \frac{1}{\sum \frac{g_i}{\mu_i}}$ ;

$$\mu_{\text{см}} = \frac{1}{\frac{0,219}{44,01 \cdot 10^3} + \frac{0,698}{28,013 \cdot 10^3} + \frac{0,03}{18,014 \cdot 10^3} + \frac{0,053}{32 \cdot 10^3}} = 30,12 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}};$$

Определим парциальные давления компонентов смеси через объемные доли:

$$P_i = P_{\text{см}} \cdot r_i;$$

$$P_{\text{CO}_2} = 1,25 \cdot 10^5 \cdot 0,15 = 0,188 \cdot 10^5 \text{ Па}; \quad P_{\text{N}_2} = 1,25 \cdot 10^5 \cdot 0,75 = 0,938 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$P_{\text{H}_2\text{O}} = 1,25 \cdot 10^5 \cdot 0,05 = 0,063 \cdot 10^5 \text{ Па}; \quad P_{\text{O}_2} = 1,25 \cdot 10^5 \cdot 0,05 = 0,063 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

$$\text{Проверка: } \sum P_i = P_{\text{см}} = (0,188 + 0,938 + 0,063 + 0,063) \cdot 10^5 = 1,25 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Определим парциальные давления компонентов смеси через массовые доли:

$$P_i = P_{\text{см}} \cdot g_i \cdot \frac{R_i}{R_{\text{см}}};$$

$$P_{\text{CO}_2} = 1,25 \cdot 10^5 \cdot 0,219 \cdot \frac{0,189}{0,276} = 0,187 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$P_{\text{N}_2} = 1,25 \cdot 10^5 \cdot 0,698 \cdot \frac{0,297}{0,276} = 0,939 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$P_{\text{H}_2\text{O}} = 1,25 \cdot 10^5 \cdot 0,03 \cdot \frac{0,461}{0,276} = 0,063 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$P_{\text{O}_2} = 1,25 \cdot 10^5 \cdot 0,053 \cdot \frac{0,26}{0,276} = 0,062 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

$$\text{Проверка: } \sum P_i = P_{\text{см}} = (0,188 + 0,938 + 0,063 + 0,063) \cdot 10^5 = 1,25 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

$$\text{Определим массу смеси: } M_{\text{см}} = P_{\text{см}} \cdot \frac{V_{\text{см}}}{R_{\text{см}} \cdot T_{\text{см}}} = 1,25 \cdot 10^5 \frac{5}{0,276 \cdot 10^3 \cdot 973} = 2,33 \text{ кг};$$

Определим массы компонентов:  $M_i = M_{\text{см}} \cdot g_i$ ;

$$M_{\text{CO}_2} = 2,33 \cdot 0,219 = 0,51 \text{ кг};$$

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = 2,33 \cdot 0,03 = 0,07 \text{ кг};$$

$$M_{\text{N}_2} = 2,33 \cdot 0,698 = 1,626 \text{ кг};$$

$$M_{\text{O}_2} = 2,33 \cdot 0,053 = 0,12 \text{ кг}.$$

$$\text{Проверка: } \sum M_i = M_{\text{см}} = 0,51 + 1,626 + 0,07 + 0,12 = 2,33 \text{ кг}.$$

Определяем парциальные объемы компонентов смеси при заданных условиях:

$$V_i = r_i \cdot V_{\text{см}};$$

$$V_{\text{CO}_2} = 0,15 \cdot 5 = 0,75 \text{ м}^3; \quad V_{\text{N}_2} = 0,75 \cdot 5 = 3,75 \text{ м}^3;$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,05 \cdot 5 = 0,25 \text{ м}^3; \quad V_{\text{O}_2} = 0,05 \cdot 5 = 0,25 \text{ м}^3.$$

$$\text{Проверка: } \sum V_i = V_{\text{см}} = 0,75 + 3,75 + 0,25 + 0,25 = 5 \text{ м}^3.$$

Определим плотности компонентов газовой смеси при заданных условиях:

$$\rho_i = \frac{M_i}{V_i};$$

$$\rho_{\text{CO}_2} = \frac{0,51}{0,75} = 0,68 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \quad \rho_{\text{N}_2} = \frac{1,626}{3,75} = 0,43 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

$$\rho_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{0,07}{0,25} = 0,28 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \quad \rho_{\text{O}_2} = \frac{0,12}{0,25} = 0,48 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Определим плотность смеси при заданных условиях через объемные доли:

$$\rho_{\text{см}} = \sum (r_i \cdot \rho_i); \quad \rho_{\text{см}} = 0,15 \cdot 0,68 + 0,75 \cdot 0,43 + 0,05 \cdot 0,28 + 0,05 \cdot 0,48 = 0,46 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Определим плотность смеси при заданных условиях через массовые доли:

$$\rho_{\text{см}} = \frac{1}{\sum \frac{g_i}{\rho_i}}; \quad \rho_{\text{см}} = \frac{1}{\frac{0,219}{0,68} + \frac{0,698}{0,43} + \frac{0,03}{0,28} + \frac{0,053}{0,48}} = 0,46 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

$$\text{Проверка: } \rho_{\text{см}} = \frac{M_{\text{см}}}{V_{\text{см}}} = \frac{2,33}{5} = 0,466 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

2. Определим параметры состояния газовой смеси и ее компонентов при нормальных условиях ( $P_{\text{н}} = 760 \text{ мм рт. ст.} = 101325 \text{ Па}$  и  $t_{\text{н}} = 0 \text{ }^\circ\text{C} = 273 \text{ К}$ ). Для определения параметров газовой смеси при нормальных условиях необходимо вычислить  $V_{\text{смн}}$ , т.к. давление и температура заданы, а  $M_{\text{см}}$  и  $R_{\text{см}}$  постоянны для данной смеси. Определим объем смеси газов:

$$V_{\text{смн}} = \frac{M_{\text{см}} \cdot R_{\text{см}} \cdot T_{\text{смн}}}{P_{\text{смн}}} = \frac{2,33 \cdot 276 \cdot 273}{101325} = 1,73 \text{ м}^3$$

Определяем парциальные объемы компонентов смеси при нормальных условиях:  $V_i = r_i \cdot V_{\text{см}}$ ;

$$V_{\text{CO}_2} = 0,15 \cdot 1,73 = 0,2595 \text{ м}^3; \quad V_{\text{N}_2} = 0,75 \cdot 1,73 = 1,2975 \text{ м}^3;$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,05 \cdot 1,73 = 0,0865 \text{ м}^3; \quad V_{\text{O}_2} = 0,05 \cdot 1,73 = 0,0865 \text{ м}^3.$$

$$\text{Проверка: } \sum V_i = V_{\text{см}} = 0,2595 + 1,275 + 0,0865 + 0,0865 = 1,73 \text{ м}^3.$$

Определим плотности компонентов газовой смеси при нормальных условиях:

$$\rho_i = \frac{M_i}{V_i};$$

$$\rho_{\text{CO}_2} = \frac{0,51}{0,2595} = 1,965 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \quad \rho_{\text{N}_2} = \frac{1,626}{1,2975} = 1,253 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

$$\rho_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{0,07}{0,0865} = 0,809 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \quad \rho_{\text{O}_2} = \frac{0,12}{0,0865} = 1,405 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

$$\text{Проверка: } \rho_i = \frac{\mu_i}{V_{\mu}}; \quad \rho_{\text{CO}_2\text{н}} = \frac{44,01}{22,4} = 1,96 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \quad \rho_{\text{N}_2\text{н}} = \frac{28,013}{22,4} = 1,25 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

$$\rho_{\text{H}_2\text{Oн}} = \frac{18,014}{22,4} = 0,80 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \quad \rho_{\text{O}_2\text{н}} = \frac{32}{22,4} = 1,43 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

Определим плотность смеси при нормальных условиях через объемные доли:

$$\rho_{\text{смн}} = \sum (r_i \cdot \rho_{\text{ин}}); \quad \rho_{\text{смн}} = 0,15 \cdot 1,965 + 0,75 \cdot 1,253 + 0,05 \cdot 0,809 + 0,05 \cdot 1,405 = 1,34 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Определим плотность смеси при нормальных условиях через массовые доли:

$$\rho_{\text{смн}} = \frac{1}{\sum \frac{g_i}{\rho_{\text{иH}}}}; \rho_{\text{смн}} = \frac{1}{\frac{0,219}{1,965} + \frac{0,698}{1,253} + \frac{0,03}{0,809} + \frac{0,053}{1,405}} = 1,34 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Проверка:  $\rho_{\text{смн}} = \frac{M_{\text{смн}}}{V_{\text{смн}}} = \frac{2,33}{1,73} = 1,34 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$

Таблица 5.1.1

Газы	r	g	$\mu, \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$	$R, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	M, кг	P, кПа	V, м <sup>3</sup>	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	V <sub>H</sub> , м <sup>3</sup>	$\rho_{\text{H}}, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
CO <sub>2</sub>	0,15	0,219	44,01	0,188	0,51	18,8	0,75	0,68	0,26	1,97
N <sub>2</sub>	0,75	0,698	28,013	0,297	1,63	93,8	3,75	0,43	1,30	1,25
H <sub>2</sub> O	0,05	0,03	18,014	0,461	0,03	6,2	0,25	0,28	0,09	0,81
O <sub>2</sub>	0,05	0,053	32	0,260	0,05	6,2	0,25	0,48	0,09	1,41
смесь	1	1	30,12	0,276	2,33	125	5	0,46	1,73	1,34

3. Определим истинные удельные теплоемкости смеси газов при заданных условиях. Вычислим массовые истинные изобарную и изохорную теплоемкости при  $t = 973 \text{ К}$ :  $c_{\text{рсм}} = \sum g_i \cdot c_{\text{pi}}$ ;

$$c_{\text{рсм}} = 0,219 \cdot 1,2276 + 0,698 \cdot 1,1618 + 0,03 \cdot 2,2734 + 0,053 \cdot 1,0860 = 1,21 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$c_{\text{Vсм}} = 0,219 \cdot 1,0387 + 0,698 \cdot 0,8633 + 0,03 \cdot 1,8120 + 0,053 \cdot 0,8260 = 0,93 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Вычислим объемные истинные изобарную и изохорную теплоемкости при  $t =$

$$973 \text{ К}: c'_{\text{рсм}} = \sum r_i \cdot c'_{\text{pi}}; \quad c'_{\text{pi}} = \frac{c_{\text{pi}}}{v_{\text{иH}}}; \quad v_{\text{иH}} = \frac{1}{\rho_{\text{иH}}}; \quad v_{\text{CO}_2\text{H}} = \frac{1}{\rho_{\text{CO}_2\text{H}}} = 0,51 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}};$$

$$v_{\text{N}_2\text{H}} = \frac{1}{\rho_{\text{N}_2\text{H}}} = 0,8 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}; \quad v_{\text{H}_2\text{OH}} = \frac{1}{\rho_{\text{H}_2\text{OH}}} = 1,24 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}; \quad v_{\text{O}_2\text{H}} = \frac{1}{\rho_{\text{O}_2\text{H}}} = 0,71 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}};$$

$$c'_{\text{PCO}_2} = \frac{c_{\text{PCO}_2}}{v_{\text{CO}_2\text{H}}} = \frac{1,2276}{0,51} = 2,4 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}; \quad c'_{\text{PN}_2} = \frac{c_{\text{PN}_2}}{v_{\text{N}_2\text{H}}} = \frac{1,1618}{0,8} = 1,45 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}};$$

$$c'_{\text{PH}_2\text{O}} = \frac{c_{\text{PH}_2\text{O}}}{v_{\text{H}_2\text{OH}}} = \frac{2,2734}{1,24} = 1,83 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}; \quad c'_{\text{PO}_2} = \frac{c_{\text{PO}_2}}{v_{\text{O}_2\text{H}}} = \frac{1,0860}{0,71} = 1,53 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}};$$

$$c'_{\text{рсм}} = 0,15 \cdot 2,4 + 0,75 \cdot 1,45 + 0,05 \cdot 1,83 + 0,05 \cdot 1,53 = 1,62 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}};$$

$$c'_{\text{Vсм}} = \sum r_i \cdot c'_{\text{vi}}; \quad c'_{\text{vi}} = \frac{c_{\text{vi}}}{v_{\text{иH}}};$$

$$c'_{\text{VCO}_2} = \frac{c_{\text{VCO}_2}}{v_{\text{CO}_2\text{H}}} = \frac{1,0387}{0,51} = 2,04 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}; \quad c'_{\text{VN}_2} = \frac{c_{\text{VN}_2}}{v_{\text{N}_2\text{H}}} = \frac{0,8633}{0,8} = 1,08 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}};$$

$$c'_{\text{vH}_2\text{O}} = \frac{c_{\text{vH}_2\text{O}}}{v_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{1,8120}{1,24} = 1,46 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}; \quad c'_{\text{vO}_2} = \frac{c_{\text{vO}_2}}{v_{\text{O}_2}} = \frac{0,8260}{0,71} = 1,16 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}};$$

$$c'_{\text{vсм}} = 0,15 \cdot 2,04 + 0,75 \cdot 1,08 + 0,05 \cdot 1,46 + 0,05 \cdot 1,16 = 0,94 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}};$$

Вычислим молярные истинные изобарную и изохорную теплоемкости при  $t = 973 \text{ К}$ :  $\mu c_{\text{рсм}} = \sum r_i \cdot \mu c_{\text{pi}}$ ;  $\mu c_{\text{pi}} = c_{\text{pi}} \cdot \mu_i$ ;

$$\mu c_{\text{PCO}_2} = c_{\text{PCO}_2} \cdot \mu_{\text{CO}_2} = 1,2276 \cdot 44,01 = 54,03 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}};$$

$$\mu c_{\text{PN}_2} = c_{\text{PN}_2} \cdot \mu_{\text{N}_2} = 1,1618 \cdot 28,013 = 32,55 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}};$$

$$\mu c_{\text{PH}_2\text{O}} = c_{\text{PH}_2\text{O}} \cdot \mu_{\text{H}_2\text{O}} = 2,2734 \cdot 18,014 = 40,95 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}};$$

$$\mu c_{\text{PO}_2} = c_{\text{PO}_2} \cdot \mu_{\text{O}_2} = 1,086 \cdot 32 = 34,75 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}};$$

$$\mu c_{\text{рсм}} = 0,15 \cdot 54,03 + 0,75 \cdot 32,55 + 0,05 \cdot 40,95 + 0,05 \cdot 34,75 = 36,31 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}};$$

$$\mu c_{\text{всм}} = \sum r_i \cdot \mu c_{\text{vi}}; \quad \mu c_{\text{vi}} = c_{\text{vi}} \cdot \mu_i;$$

$$\mu c_{\text{vCO}_2} = c_{\text{vCO}_2} \cdot \mu_{\text{CO}_2} = 1,0387 \cdot 44,01 = 45,71 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}};$$

$$\mu c_{\text{vN}_2} = c_{\text{vN}_2} \cdot \mu_{\text{N}_2} = 0,8633 \cdot 28,013 = 24,18 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}};$$

$$\mu c_{\text{vH}_2\text{O}} = c_{\text{vH}_2\text{O}} \cdot \mu_{\text{H}_2\text{O}} = 1,812 \cdot 18,014 = 32,64 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}};$$

$$\mu c_{\text{vO}_2} = c_{\text{vO}_2} \cdot \mu_{\text{O}_2} = 0,826 \cdot 32 = 26,43 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}};$$

$$\mu c_{\text{всм}} = 0,15 \cdot 45,71 + 0,75 \cdot 24,18 + 0,05 \cdot 32,64 + 0,05 \cdot 26,43 = 27,95 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}.$$

$$\text{Проверка: } \mu c_{\text{всм}} = \mu c_{\text{рсм}} - 8,314; \quad \mu c_{\text{рсм}} - \mu c_{\text{всм}} = 8,314;$$

$$\mu c_{\text{рсм}} - \mu c_{\text{всм}} = 36,31 - 27,95 = 8,34 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}$$

$$c'_{\text{рсм}} = \frac{\mu c_{\text{рсм}}}{22,4} = \frac{36,31}{22,4} = 1,62 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}; \quad c'_{\text{всм}} = \frac{\mu c_{\text{всм}}}{22,4} = \frac{27,95}{22,4} = 1,25 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}};$$

$$c_{\text{рсм}} = \frac{\mu c_{\text{рсм}}}{\mu_{\text{см}}} = \frac{36,31}{30,12} = 1,21 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; \quad c_{\text{всм}} = \frac{\mu c_{\text{всм}}}{\mu_{\text{см}}} = \frac{27,95}{30,12} = 0,93 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

4. Определим количество теплоты необходимо затратить, чтобы изменить температуру смеси газов в интервале температур от 300 до 1300 °С в изобарном и изохорном процессах 2 молей, 5 м<sup>3</sup> и 7 кг смеси.

Для выполнения расчета нам необходимо знать средние удельные изобарные и изохорные теплоемкости. Для этого воспользуемся табличным способом. В

нашем случае средняя удельная теплоемкость в интервале температур  $t_1-t_2$  может принята как средне арифметическая между истинными теплоемкостями  $c_1$  (при температуре  $t_1$ ) и  $c_2$  (при температуре  $t_2$ ), т.е.  $c_m = \frac{(c_1 + c_2)}{2}$ , либо как истинная удельная теплоемкость при среднеарифметической температуре процесса, т.е. при температуре  $t_m = \frac{t_1 + t_2}{2}$ . Такой способ вносит некоторую неточность в расчеты, однако незначительную, и поэтому часто ею можно пренебречь.

Определим количество теплоты необходимо затратить, чтобы изменить температуру смеси газов в интервале температур от 300 до 1300 °С в изобарном и изохорном процессах 7 кг смеси:

$$Q_{P1} = 7 \cdot c_{P\text{см}} \Big|_{t_1}^{t_2} \cdot (t_2 - t_1); \quad Q_{V1} = 7 \cdot c_{V\text{см}} \Big|_{t_1}^{t_2} \cdot (t_2 - t_1);$$

$$t_m = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{300 + 1300}{2} = 800^\circ\text{C}; \Rightarrow c_{P\text{см}} \Big|_{t_1}^{t_2} = c_{P\text{см}}(800^\circ\text{C}) = \sum g_i \cdot c_{Pi} = 1,23 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$c_{V\text{см}} \Big|_{t_1}^{t_2} = c_{V\text{см}}(800^\circ\text{C}) = \sum g_i \cdot c_{Vi} = 0,95 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$Q_{P1} = 7 \cdot 1,23 \cdot 1000 = 8610 \text{ кДж}; \quad Q_{V1} = 7 \cdot 0,95 \cdot 1000 = 6650 \text{ кДж}.$$

Определим количество теплоты необходимо затратить, чтобы изменить температуру смеси газов в интервале температур от 300 до 1300 °С в изобарном и изохорном процессах 2 молей:

$$Q_{P2} = 2 \cdot \mu c_{P\text{см}} \Big|_{t_1}^{t_2} \cdot (t_2 - t_1); \quad Q_{V2} = 2 \cdot \mu c_{V\text{см}} \Big|_{t_1}^{t_2} \cdot (t_2 - t_1);$$

$$t_m = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{300 + 1300}{2} = 800^\circ\text{C}; \Rightarrow$$

$$\mu c_{P\text{см}} \Big|_{t_1}^{t_2} = \mu c_{P\text{см}}(800^\circ\text{C}) = c_{P\text{см}} \cdot \mu_{\text{см}} = 1,2286 \cdot 30,12 = 37 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}};$$

$$\mu c_{V\text{см}} \Big|_{t_1}^{t_2} = \mu c_{V\text{см}}(800^\circ\text{C}) = c_{V\text{см}} \cdot \mu_{\text{см}} = 0,9524 \cdot 30,12 = 28,67 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}};$$

$$Q_{P2} = 2 \cdot 37 \cdot 1000 = 74 \text{ кДж}; \quad Q_{V2} = 2 \cdot 28,67 \cdot 1000 = 57,34 \text{ кДж}.$$

Определим количество теплоты необходимо затратить, чтобы изменить температуру смеси газов в интервале температур от 300 до 1300 °С в изобарном и изохорном процессах 5 м<sup>3</sup> смеси:

$$Q_{P3} = 5 \cdot c'_{P\text{см}} \Big|_{t_1}^{t_2} \cdot (t_2 - t_1); \quad Q_{V3} = 5 \cdot c'_{V\text{см}} \Big|_{t_1}^{t_2} \cdot (t_2 - t_1);$$

$$t_m = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{300 + 1300}{2} = 800^\circ\text{C}; \Rightarrow$$

$$c'_{P\text{см}} \Big|_{t_1}^{t_2} = c'_{P\text{см}}(800^\circ\text{C}) = \frac{\mu c_{P\text{см}}}{22,4} = \frac{37}{22,4} = 1,65 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}};$$

$$c'_{V\text{см}} \Big|_{t_1}^{t_2} = c'_{V\text{см}}(800^\circ\text{C}) = \frac{\mu c_{V\text{см}}}{22,4} = \frac{28,67}{22,4} = 1,28 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}};$$

$$Q_{P3} = 5 \cdot 1,65 \cdot 1000 = 8250 \text{ кДж}; \quad Q_{V3} = 5 \cdot 1,28 \cdot 1000 = 6400 \text{ кДж}.$$

## 5.2. Расчет теоретической сушилки

Условия 25 заданий приведены в табл.2 приложения. Условия индивидуального задания берутся в соответствии с вариантом (графа 1).

Для сушки материала в теоретической сушилке используется атмосферный воздух. В процессе сушки атмосферный воздух находящийся в состоянии 1 (графы 2, 3, 4, табл.2, приложения), направляется в калорифер где нагревается до состояния 2 (графы 5, 6, табл.2, приложения) и направляется в сушильную камеру откуда выходит в состоянии 3 (графы 7, 8, 9, 10, табл.2, приложения).

Требуется произвести расчет процесса сушки по законам и аналитическим зависимостям реального газа.

1. Определить все параметры воздуха в процессе сушки. Полученные результаты внести в табл.5.2.1.

Таблица 5.2.1

Состояния воздуха	t, °C	d, кг/кг	φ, %	P <sub>п</sub> , кПа	h, кДж/кг	μ, кг/кмоль	R <sub>вв</sub> , Дж/кг·К	v, м <sup>3</sup> /кг	ρ, кг/м <sup>3</sup>	P <sub>в</sub> , кПа

2. Вычертить график процесса сушки на h,d-диаграмме.

Пример расчета

Вариант 0.

$$t_1 = 15 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$d_1 = 8 \text{ г/кг};$$

$$t_2 = 60 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_3 = 37 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$B = 99325 \text{ Па.}$$

Решение:

Определим неизвестные параметры в первоначальном состоянии (состояние 1).

Находим энтальпию смеси:  $h_1 = 1,0048 \cdot t_1 + d_1(2500 + 1,96 \cdot t_1)$ ;

$$h_1 = 1,0048 \cdot 15 + 0,008 \cdot (2500 + 1,96 \cdot 15); h_1 = 35,31 \text{ кДж/кг.}$$

По известной температуре  $t_1$  находим давление насыщенного водяного пара  $P_{н1}$  по таблице «Параметры насыщенного водяного пара по температурам»:

$$t_1 = 15 \text{ }^\circ\text{C}; P_{н1} = 1704,1 \text{ Па} = 1,7041 \text{ кПа.}$$

Определим удельный объем смеси:

$$v_1 = \frac{R \cdot T_1}{B(1 + d_1)} = \frac{288,7 \cdot 288}{99325(1 + 0,008)} = 0,83 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Находим относительную влажность воздуха:

$$d_1 = 0,622 \cdot \frac{\varphi_1 \cdot P_{н1}}{B - \varphi_1 \cdot P_{н1}} \Rightarrow \varphi_1 = \frac{d_1 \cdot B}{P_{н1}(d_1 + 0,622)} = \frac{0,008 \cdot 99325}{1,7041 \cdot 10^3(0,008 + 0,622)} = 74\%$$

Находим парциальное давление пара  $P_{п1}$ :

$$\varphi_1 = \frac{P_{n1}}{P_{n1}} \Rightarrow P_{n1} = \varphi_1 \cdot P_{n1} = 1,7041 \cdot 10^3 \cdot 0,74 = 1261 \text{ Па} = 1,26 \text{ кПа}.$$

Определяем молекулярную массу:  $\mu_1 = 28,95 - 10,934 \varphi_1 \frac{P_{n1}}{B}$ ;

$$\mu_1 = 28,95 - 10,934 \cdot 0,74 \cdot \frac{1704,1}{99325} = 28,8 \text{ кг / кмоль}.$$

Газовая постоянная влажного воздуха:  $R_{вв1} = \frac{R_{\mu}}{\mu_1} = \frac{8,314}{28,8} = 288,7 \text{ Дж / кг} \cdot \text{К}.$

Плотность влажного воздуха:  $\rho_1 = \frac{\varphi_1}{v_1''}$ , где  $v_1''$  – объем сухого насыщенного пара при температуре  $t_1$  из таблицы «Параметры насыщенного водяного пара по температурам»;  $\rho_1 = \frac{0,74}{77,973} = 0,0095 \text{ кг / м}^3$ .

Находим давление воздуха:  $P_{в1} = B - P_{n1} = 99325 - 1260 = 98065 \text{ Па} = 98,1 \text{ кПа}.$

В процессе нагревания 1–2 воздуха влагосодержание  $d_1 = d_2$ , тогда  $d_2 = 8 \text{ г / кг} = 0,008 \text{ кг / кг}.$

Находим энтальпию влажного воздуха в данном состоянии:  $h_2 = 1,0048 \cdot t_2 + d_2(2500 + 1,96 \cdot t_2)$ ;  $h_2 = 1,0048 \cdot 60 + 0,008 \cdot (2500 + 1,96 \cdot 60)$ ;  $h_1 = 81,2 \text{ кДж / кг}.$

По известной температуре  $t_2$  находим давление насыщенного водяного пара  $P_{н2}$  по таблице «Параметры насыщенного водяного пара по температурам»:

$t_2 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $P_{н2} = 19,919 \text{ кПа} = 19919 \text{ Па}.$

Находим относительную влажность воздуха:

$$d_2 = 0,622 \cdot \frac{\varphi_2 \cdot P_{н2}}{B - \varphi_2 \cdot P_{н2}} \Rightarrow \varphi_2 = \frac{d_2 \cdot B}{P_{н2}(d_2 + 0,622)} = \frac{0,008 \cdot 99325}{19919(0,008 + 0,622)} = 6,3\%$$

Находим парциальное давление пара  $P_{п2}$ :

$$\varphi_2 = \frac{P_{п2}}{P_{н2}} \Rightarrow P_{п2} = \varphi_2 \cdot P_{н2} = 0,063 \cdot 19919 = 1255 \text{ Па} = 1,26 \text{ кПа}.$$

Определяем молекулярную массу влажного воздуха:  $\mu_2 = 28,95 - 10,934 \varphi_2 \frac{P_{н2}}{B}$ ;

$$\mu_2 = 28,95 - 10,934 \cdot 0,063 \cdot \frac{19919}{99325} = 28,8 \text{ кг / кмоль}.$$

Газовая постоянная влажного воздуха:  $R_{вв2} = \frac{R_{\mu}}{\mu_2} = \frac{8,314}{28,8} = 288,7 \text{ Дж / кг} \cdot \text{К}.$

Плотность влажного воздуха:  $\rho_2 = \frac{\varphi_2}{v_2''}$ , где  $v_2''$  – объем сухого насыщенного пара при температуре  $t_2$  из таблицы «Параметры насыщенного водяного пара по температурам»;  $\rho_2 = \frac{0,063}{7,6776} = 0,008 \text{ кг / м}^3$ .

Находим давление воздуха:  $P_{в2} = B - P_{п2} = 99325 - 1255 = 98070 \text{ Па} = 98,1 \text{ кПа}.$

Процесс сушки 2–3 влажного воздуха проходит при равных значениях энтальпии,  $h_2 = h_3 = 81,2$  кДж/кг.

Влагосодержание в состоянии 3:  $h_3 = 1,0048 \cdot t_3 + d_3(2500 + 1,96 \cdot t_3) \Rightarrow$

$$d_3 = \frac{h_3 - 1,0048 t_3}{2500 + 1,96 t_3} = \frac{81,200 - 1,0048 \cdot 37}{2500 + 1,96 \cdot 37} = 17,1 \text{ г / кг} = 0,0171 \text{ кг / кг}$$

По известной температуре  $t_3$  находим давление насыщенного водяного пара  $P_{н3}$  по таблице «Параметры насыщенного водяного пара по температурам»:  
 $t_3 = 37$  °С;  $P_{н2} = 6,32308$  кПа = 6323,08 Па.

Определим относительную влажность воздуха:  $d_3 = 0,622 \cdot \frac{\varphi_3 \cdot P_{н3}}{B - \varphi_3 \cdot P_{н3}} \Rightarrow$

$$\varphi_3 = \frac{d_3 \cdot B}{P_{н3}(d_3 + 0,622)} = \frac{0,017 \cdot 99325}{1704,1 \cdot (0,017 + 0,622)} = 41\% .$$

Находим парциальное давление пара  $P_{п3}$ :

$$\varphi_3 = \frac{P_{п3}}{P_{н3}} \Rightarrow P_{п3} = \varphi_3 \cdot P_{н3} = 0,41 \cdot 6323,08 = 2593 \text{ Па} = 2,6 \text{ кПа} .$$

Определяем молекулярную массу влажного воздуха:  $\mu_3 = 28,95 - 10,934 \varphi_3 \frac{P_{н3}}{B}$  ;

$$\mu_3 = 28,95 - 10,934 \cdot 0,41 \cdot \frac{6323,08}{99325} = 28,66 \text{ кг / кмоль} .$$

Газовая постоянная влажного воздуха:  $R_{вв3} = \frac{R_{\mu}}{\mu_3} = \frac{8,314}{28,66} = 290 \text{ Дж / кг} \cdot \text{К} .$

Определим удельный объем смеси:

$$v_3 = \frac{R \cdot T_3}{B(1 + d_3)} = \frac{290 \cdot 310}{99325(1 + 0,017)} = 0,89 \text{ м}^3 / \text{кг} .$$

Плотность влажного воздуха:  $\rho_3 = \frac{\varphi_3}{v_3''}$ , где  $v_3''$  – объем сухого насыщенного пара при температуре  $t_3$  из таблицы «Параметры насыщенного водяного пара по температурам»;  $\rho_3 = \frac{0,41}{22,9654} = 0,02 \text{ кг / м}^3$  .

Находим давление воздуха:  $P_{в3} = B - P_{п3} = 99325 - 2593 = 96732 \text{ Па} = 96,7 \text{ кПа} .$

Таблица 5.2.1

Состояния воздуха	t, °С	d, кг/кг	$\varphi$ , %	$P_{п}$ , кПа	h, кДж/кг	$\mu$ , кг/кмоль	$R_{вв}$ , Дж/кг·К	v, м <sup>3</sup> /кг	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$P_{в}$ , кПа
1 состояние	15	8	74	1,26	35,31	28,8	288,7	0,83	0,0095	98,1
2 состояние	60	17,1	6,3	1,26	81,5	28,8	288,7	0,96	0,008	98,1
3 состояние	37	17,1	41	2,6	81,5	28,66	290	0,89	0,02	96,7

Определяем расход воздуха  $M$ , необходимый для испарения 1 кг влаги:

$$M = \frac{1000}{d_3 - d_2} = \frac{1000}{17,1 - 8} = 110 \text{ кг/кг},$$

где  $d_3 - d_2$  – количество влаги, испаренной в сушилке.

Определим расход теплоты  $Q$  для испарения 1 кг влаги:  $Q = M (h_2 - h_1) = 110(81,5 - 35,31) = 5081$  кДж/кг, где  $h_2 - h_1$  – количество тепла, затрачиваемое в калорифере на подогрев 1 кг сухого воздуха.

2. Вычертим график процесса сушки на  $h, d$ -диаграмме по результатам расчета.

## Библиографический список

1. Кузовлев В.А. Техническая термодинамика и основы теплопередачи: Учебник для машиностр. спец. техникумов – 2–е изд., перераб. и доп./ Под ред. Л.Р. Стоцкого. – М.: Высш. шк., 1983. – 335 с.
2. Лариков Н.Н. Общая теплотехника: Учеб. пособие для вузов.– 2–е изд., перераб. и доп.– М.: Стройиздат, 1975. – 559 с.
3. Теплотехника: Учебник для вузов. – 3–е изд., испр./ В.Н. Луканин, М.Г. Шатров и др./ Под ред. В.Н. Луканина. – М.: Высш. шк., 2002. – 671 с.
4. Трофимова Т.И. Курс физики: Учеб. пособие для вузов, – 3–е изд., испр. – М.: Высш. шк., 1994. – 416 с.