

Тема 2.6 Влажный воздух

План

- 1 Основные характеристики влажного воздуха
- 2 i - d -диаграмма влажного воздуха
- 3 Задачи, решаемые по i - d -диаграмме

Основная литература:

1 Крестин Евгений Александрович. Основы гидравлики и теплотехники Редактор: Смирнова Н. А. Издательство: Кнорус, 2020 г.

Серия: Среднее профессиональное образование

Подробнее: <https://www.labirint.ru/books/733774/>

2 Брюханов О.Н, Мелик-Аракелян А.Т., Коробко В.И. Основы гидравлики и теплотехники: учебник(3-е издание), - М.: Издательский центр «Академия», 2017.

3 Лашутина Н.Г. и др. Техническая термодинамика с основами теплопередачи и гидравлики: учебник- Л.: Машиностроение,1988.

Дополнительная литература:

1 Кудинов, В. А. Техническая термодинамика и теплопередача: учебник для среднего профессионального образования / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов, Е. В. Стефанюк. -4-е изд., перераб. и доп. - Москва: Издательство Юрайт, 2022. - 454 с. - (Профессиональное образование). — ISBN 978-5-534-12196-4. - Текст: электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. —URL: <https://urait.ru/bcode/495923> .

2 Жуховицкий Д.А.Сборник задач по технической термодинамике: учебное пособие, второе издание-г. Ульяновк,2007

Интернет-ресурсы:

1 Федеральный центр информационно-образовательных ресурсов. – Режим доступа: <http://fcior.edu.ru>

2 Электронная библиотека. Электронные учебники. - Режим доступа: <http://subscribe.ru/group/mechanika-studentam/>

1 Основные характеристики влажного воздуха

Атмосферный воздух является смесью собственно сухого воздуха и водяных паров, поэтому может быть назван *влажным воздухом*. В технике атмосферный воздух получил широкое применение. В некоторых технических устройствах он является основным рабочим телом, как, например, в воздушных холодильных установках, воздухоохладителях и других теплообменных устройствах, в сушильных устройствах, где с помощью воздуха производится подсушка материалов (например, древесины). В других технических устройствах атмосферный воздух может являться важной составной частью рабочих тел, например: продуктов сгорания в двигателях внутреннего сгорания и газовых турбинах, в топочных устройствах котельных агрегатов и пр. Во всех этих случаях содержание влаги в воздухе может изменяться в самых широких пределах, и в расчетах с этим приходится считаться.

Известно, что атмосферный воздух обладает ограниченной способностью поглощать влагу извне. Поэтому, если при расчете сушильного устройства неправильно определить объем проходящего через нее воздуха, то может получиться так, что воздуха окажется недостаточно, тогда часть испаренной влаги не будет вынесена из сушильного устройства, или если будет проходить воздуха в большем объеме, чем это необходимо, то часть его пройдет неиспользованной. И то и другое экономически невыгодно.

Газообразные продукты сгорания, покидая котельный агрегат, имеют относительно высокую температуру и соответствующий запас внутренней энергии. Часть ее обычно используют в водяном экономайзере (устройство для подогрева питательной воды, поступающей в котел) и в воздухоподогревателе для подогрева воздуха, поступающего в топку. При расчете устройств, в которых подогреваются вода или воздух, не допускается, чтобы температура газов в них понижалась до температуры точки росы, т. е. до температуры, при которой начинается конденсация паров воды, иначе, оседая на стенках этих устройств, конденсат вызовет их коррозию, а это сократит срок службы таких устройств.

Приведенные примеры показывают необходимость знания свойств влажного воздуха и прежде всего знания его технических характеристик.

Одной из таких характеристик является безразмерное массовое отношение влаги к сухому воздуху:

$$d = m_g/m_c, \quad (2.6.1)$$

где m_g — масса влаги; m_c — масса сухого воздуха. Эту характеристику ранее называли *влажностью*.

Влажный воздух можно рассматривать как смесь идеальных газов и применять к нему закон Дальтона, согласно которому

$$p = p_B + p_n \quad (2.6.2)$$

где p — давление влажного воздуха; p_B и p_n — парциальные давления соответственно воздуха и пара.

Напишем уравнения состояния для сухого воздуха и водяного пара:

$$p_g V = m_g + R_g T \quad (2.6.3)$$

$$p_n V = m_n R_n T \quad (2.6.3a)$$

Произведя почленное деление этих двух уравнений состояния, получим

$$p_g / p_n = (R_g / R_n) (m_g / m_n)$$

После подстановки значений $R_g = 287,1 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ и $R_n = 461,5 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ получим

$$p_g / p_n = 0,622 m_g / m_n \quad (2.6.3b)$$

или используя уравнение (2.6.1),

$$p_g / p_n = 0,622 / d \quad (2.6.3b)$$

После подстановки значений p_B из формулы можем написать

$$(p - p_n) / p_n = 0,622 / d$$

откуда

$$d = 0,622 p_n / (p - p_n) \quad (2.6.4)$$

Из этого уравнения следует, что при постоянном давлении влажного воздуха p с увеличением массового отношения влаги к сухому воздуху d будет расти парциальное давление пара p_n . Процесс увлажнения может происходить до тех пор, пока насыщенность воздуха влагой не достигнет максимального значения, соответствующего данному давлению влажного воздуха.

В связи с этим выявляется необходимость оценки качества влажного воздуха по степени его увлажнения. Для такой оценки вводятся две технические характеристики: *массовая концентрация* водяных паров в воздухе (старое название ее абсолютная влажность воздуха) и *относительная концентрация* водяных паров в воздухе (старое название ее относительная влажность воздуха).

Массовая концентрация водяных паров в воздухе — физическая величина, равная отношению массы водяных паров в воздухе к объему влажного воздуха.

Как следует из этого определения, массовая концентрация водяных паров в воздухе равна плотности пара при его парциальном давлении и температуре влажного воздуха p_n :

$$p_n = m_n / V_v$$

где V_v — объем влажного воздуха, м³.

Если, не изменяя давления, увлажнять воздух, то, когда массовое отношение влаги к влажному воздуху достигнет значения $d_{\max}$, а парциальное давление пара — значения $p_{\max}$, плотность пара, содержащегося в воздухе, станет максимальной $p_{\max}$.

Относительная концентрация водяных паров в воздухе — физическая величина, равная отношению массовой концентрации водяных паров к максимально возможной при том же давлении (или отношению плотности водяных паров при заданном давлении к максимально возможной плотности при том же давлении):

$$\varphi = d/d_{\max} = p/p_{\max} \quad (2.6.5)$$

Значение φ может изменяться от 0 для сухого воздуха до 1 (или 100%) для насыщенного воздуха.

Если температура влажного воздуха равна или меньше температуры насыщения при заданном давлении влажного воздуха, то $p_{\max}$ равно плотности сухого насыщенного пара (при заданной температуре) p'' . В таком случае значения $p_{\max}$ (или, что то же, p'') можно найти по таблице параметров сухого насыщенного водяного пара.

Если же температура воздуха выше температуры насыщения пара при заданном давлении смеси, то это значит, что пар в воздухе находится в ненасыщенном, т. е. в перегретом, состоянии. В этом случае плотность перегретого пара p меньше $p_{\max}$, и ее следует вычислять по таблицам параметров перегретых паров, из которых берется значение удельного объема

перегретого пара ν при давлении и температуре влажного воздуха, а затем подсчитывается плотность по формуле $\rho = 1/\nu$.

Если водяной пар, содержащийся в воздухе, находится в перегретом состоянии и если такой воздух охлаждать, не изменяя парциального давления пара, то в некоторый момент он станет насыщенным. Температура, при которой это произойдет, называется *температурой точки росы*. В этот момент относительная концентрация водяных паров будет равна 100%.

Удельная энтальпия влажного воздуха i_x равна сумме удельных энтальпий сухого воздуха i_s и водяного пара di_n :

$$i_x = i_s + di_n. \quad (2.6.6)$$

Удельная энтальпия сухого воздуха

$$i_s = c_p (t - t_0) \quad (2.6.6a)$$

[при $t_0 = 0^\circ \text{C}$ удельная теплоемкость воздуха $c_p = 1 \text{ кДж/ (кг} \cdot \text{К)}$]

Удельную энтальпию сухого насыщенного водяного пара при давлениях, близких к атмосферному, можно определить по приближенной эмпирической формуле

$$i_n = 2480 + 1,96t, \quad (2.6.6б)$$

где t — температура насыщения при парциальном давлении пара.

2 $i(h)$ - d -диаграмма влажного воздуха

На i - d -диаграмме, схема которой дана на рисунке 2.6.1, по оси ординат откладываются значения удельных энтальпий влажного пара $i(h)$, а по оси абсцисс — значения массового отношения водяных паров к воздуху d .

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

При таком взаимном расположении осей координат линии постоянных значений удельной энтальпии ($i = \text{const}$), которые должны быть параллельны оси абсцисс, идут наклонно (рис. 2.6.1). Однако чтобы удобнее было производить на диаграмме отсчеты, из начала координат O проводится горизонталь ON , на которую спроектированы значения удельной энтальпии $i_1, i_2, i_3, \dots$. При этом линии постоянных значений массовых отношений $d_1, d_2, d_3, \dots$ идут в виде прямых, параллельных оси ординат, т. е. вертикально.

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 $t_{m,1}$, $t_{m,2}$, $t_{m,3}$, 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 теплового 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 $i-d$ -диаграмме довести до пограничной кривой $\varphi = 100\%$, например точка a на рисунке 22.6.1, 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 шарiku 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, например, до точки a пограничной кривой $\varphi = 100\%$), температура сухого термометра понизится до истинной температуры мокрого термометра и станет определяться изотермой, на которой лежит точка a , т. е. изотермой t_{ms} .

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

3 Задачи, решаемые по $i-d$ -диаграмме

Познакомимся с некоторыми задачами, решаемыми по $i-d$ -диаграмме.

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

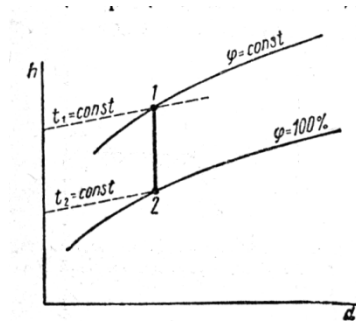


Рисунок 2.6.2- Нахождение точки росы на i - d -диаграмме

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 $i = \text{const}$.

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

Нахождение точки росы. Определив по двум параметрам, например φ и t или t_M и t , или другим, состояние заданного воздуха (пусть это будет точка 1 на рис. 2.6.2), нужно провести от нее вертикаль до пограничной кривой $\varphi = 100\%$ (точка 2 на этом же рисунке). Тогда изотерма t_2 , на которой лежит точка 2, определит температуру точки росы воздуха заданного состава.

Контрольные вопросы

1. Что такое массовая концентрация влаги в воздухе?
2. Что такое относительная концентрация влаги в воздухе?
3. Линии каких процессов нанесены на i - d -диаграмме?
4. Что такое истинная температура мокрого термометра?
5. Как находится на i - d -диаграмме точка росы?