

Тема 6. Реальные газы. Водяной пар. Влажный воздух.

6.1. Свойства реальных газов.

Реальные газы отличаются от идеальных газов тем, что молекулы этих газов имеют объемы и связаны между собой силами взаимодействия, которые уменьшаются с увеличением расстояния между молекулами. При практических расчетах различных свойств реальных газов наряду с уравнением состояния применяется отношение $P \cdot v / (R \cdot T) = c$, которая называется коэффициентом сжимаемости.

Так как для идеальных газов при любых условиях $P \cdot v = R \cdot T$, то для этих газов $c = 1$. Тогда величина коэффициента сжимаемости выражает отклонение свойств реального газа от свойств идеального. Величина c для реальных газов в зависимости от давления и температуры может принимать значения больше или меньше единицы и только при малых давлениях и высоких температурах она практически равна единице. Тогда реальные газы можно рассматривать как идеальные.

В связи с отличием свойств реального газа от свойств идеального газа нужно иметь новые уравнения состояния, которые связывали бы значения P , v , T и давали бы возможность рассчитывать некоторые свойства газов для разных условий. Были предложены многочисленное число различных уравнений состояния реальных газов, но ни одно из них не решает проблему для общего случая. Развитие кинетической теории газов, позволило установить точное уравнение состояния реальных газов в виде:

$$P \cdot v = R \cdot [1 - \sum v / (v + 1) \cdot B_v / v^v]. \quad (6.1)$$

B_v – вириальные коэффициенты, выражаются через потенциальные энергию взаимодействия молекул данного газа и температуру T .

Однако это уравнение в общем виде не может быть использовано для непосредственных расчетов реальных газов. Для отдельных частных случаях получены расчетные уравнения того или иного реального газа. Из-за сложности вычисления вириальных коэффициентов обычно ограничиваются расчетом первых двух коэффициентов. Тогда расчетное уравнение имеет вид:

$$P \cdot v = R \cdot (1 - A/v - B/v^2), \quad (6.2)$$

где A и B – первый и второй вириальные коэффициенты, являющиеся функцией только температуры.

При расчете свойств многих реальных газов уравнения такого типа получили большое распространение.

6.2. Уравнения состояния реального газа.

Наиболее простым и качественно верно отображающим поведение реального газа, является уравнение Ван-дер-Ваальса:

$$(P + a/v^2) \cdot (v - b) = R \cdot T. \quad (6.3)$$

a , b – постоянные величины, первая учитывает силы взаимодействия, вторая учитывает размер молекул.

a/v^2 – характеризует добавочное давление, под которым находится реальный газ вследствие сил сцепления между молекулами и называется внутренним давлением. Для жидких тел это давление имеет большие значения (например, для воды при 20°C

составляет 1050 Мпа), а для газов из-за малых сил сцепления молекул оно очень мало. Поэтому внешнее давление, под которым находится жидкость, оказывает ничтожное влияние на её объем, и жидкость считают несжимаемой. В газах в виду малости значения a/v^2 внешнее давление легко изменяет их объем.

Уравнение Ван-дер-Ваальса качественно верно отображает поведение жидких и газообразных веществ, для двухфазных состояний оно неприменимо.

На PV – диаграмме (рис.6.1) показаны изотермы построенные по уравнению Ван-дер-Ваальса. Из кривых видно, что при сравнительно низких температурах имеются волнообразные участки. Чем выше температура, тем короче эти части кривых. Эти волнообразные кривые указывают на непрерывный переход от жидкого состояния в парообразное при данной температуре. Точка А соответствует состоянию жидкости, точка В относится парообразному состоянию вещества.

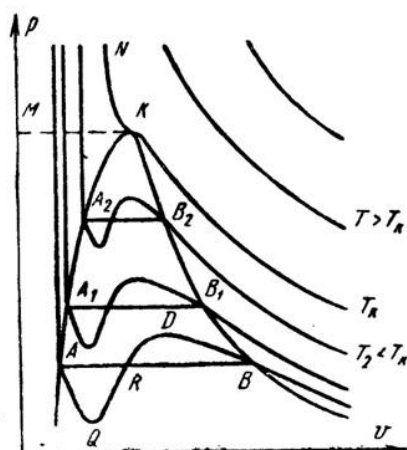


Рис. 6.1.

В действительности переход из жидкого состояния в парообразное всегда происходит через двухфазное состояние вещества. При этом при данной температуре процесс перехода происходит также и при постоянном давлении. Этот действительный переход из жидкого состояния в парообразное изображается прямой линией АВ.

Практически для особо чистых веществ возможно осуществление участков волнообразной кривой АQ и DB. В первом случае имеют место неустойчивые состояния перегретой жидкости, а во втором – переохлажденного пара.

При определенной температуре изотерма уравнения Ван-дер-Ваальса не будет иметь волнообразного участка (точка К). Эту температуру называют критической. Если соединить точки А₁, А₂, А₃ ... и В₁, В₂, В₃ ... получим кривую похожую на параболу. Кривая АК называется нижней пограничной кривой и соответствует в состоянии кипения жидкости. Кривая KB называется верхней пограничной кривой и соответствует состояния сухого насыщенного пара.

Таким образом, для реального вещества PV – диаграмму можно разбить на 3 области:

- 1 - область жидкого состояния, расположена левее нижней пограничной кривой;
- 2 - область двухфазных состояний (влажный пар), расположена между нижней и верхней пограничной кривой);
- 3 – область перегретого пара, расположена правее верхней пограничной кривой и выше критической точки. Условно область жидкости ограничивают сверху линией KM – критическая изобара.

Критическую температуру Д.И.Менделеев называл абсолютной температурой кипения, при которой поверхностное натяжение в жидкости становится равным нулю, т.е. исчезает различие между жидкостью и парообразным состоянием вещества (насыщенным паром). Связь между критическими параметрами и постоянными уравнения Ван-дер-Ваальса:

$$T_k = 8 \cdot a / (27 \cdot R \cdot b) ; P_k = a / (27 \cdot b^2) ; (6.4)$$

$$a = (27 \cdot R^2 \cdot T_k^2) / (64 \cdot P_k) ; b = (27 \cdot R \cdot T_k) / (8 \cdot P_k). (6.5)$$

Уравнение Ван-дер-Ваальса при больших плотностях газа дает значительные ошибки. Кроме этого экспериментальным путем доказана, что коэффициенты a , b зависят от температуры и давления, причем эта зависимость очень сложная. М.П.Вукалович и И.И.Новиков в 1939 г. предложили новое универсальное уравнение состояния реальных газов с учетом ассоциации и диссоциации их молекул, который имеет следующий вид:

$$(P + a/v^2) \cdot (v - b) = R \cdot T (1 - C / (v \cdot T^{(3+2m)/2})), (6.6)$$

где a , b – постоянные уравнения Ван-дер-Ваальса;
 C , m – постоянные, определяемые на основании опытных данных.

6.3. Понятия о водяном паре.

Одним из распространенным рабочим телом в паровых турбинах, паровых машинах, в атомных установках, теплоносителем в различных теплообменниках является водяной пар.

Пар - газообразное тело в состоянии, близкое к кипящей жидкости.

Парообразование – процесс превращения вещества из жидкого состояния в парообразное.

Испарение – парообразование, происходящее всегда при любой температуре с поверхности жидкости.

При некоторой определенной температуре, зависящей от природы жидкости и давления, под которым она находится, начинается парообразование во всей массе жидкости. Этот процесс называется кипением.

Обратный процесс парообразования называется конденсацией. Она также протекает при постоянной температуре.

Процесс перехода твердого вещества непосредственно в пар называется сублимацией.

Обратный процесс перехода пара в твердое состояние называется десублимацией.

При испарении жидкости в ограниченном пространстве (в паровых котлах) одновременно происходит обратное явление – конденсация пара. Если скорость конденсации станет равной скорости испарения, то наступает динамическое равновесие. Пар в этом случае имеет максимальную плотность и называется насыщенным паром.

Если температура пара выше температуры насыщенного пара того же давления, то такой пар называется перегретым. Разность между температурой перегретого пара и температурой насыщенного пара того же давления называется степенью перегрева. Так как удельный объем перегретого пара больше удельного объема насыщенного пара, то плотность перегретого пара меньше плотности насыщенного пара. Поэтому перегретый пар является ненасыщенным паром.

В момент испарения последней капли жидкости в ограниченном пространстве без изменения температуры и давления образуется сухой насыщенный пар. Состояние такого пара определяется одним параметром - давлением.

Механическая смесь сухого и мельчайших капелек жидкости называется влажным паром.

Массовая доля сухого пара во влажном паре называется степенью сухости – x .

$$x = m_{сп} / m_{вп}, (6.7)$$

$m_{сп}$ - масса сухого пара во влажном;

$m_{вп}$ - масса влажного пара.

Массовая доля жидкости во влажном паре называется степенью влажности – y .

$$y = 1 - x. (6.8)$$

Для кипящей жидкости при температуре насыщения $x = 0$, для сухого пара – $x = 1$.

6.4. Характеристики влажного воздуха.

Атмосферный воздух, в основном состоящий из кислорода, азота, углекислого газа, содержит всегда некоторое количество водяного пара.

Смесь сухого воздуха и водяного пара называется влажным воздухом.

Влажный воздух при данном давлении и температуре может содержать разное количество водяного пара. Если смесь состоит из сухого воздуха и насыщенного водяного пара, то его называют насыщенным влажным воздухом. В этом случае во влажном воздухе находится максимально возможное для данной температуры количество водяного пара. При охлаждении этого воздуха, будет происходить конденсация водяного пара. Парциальное давление водяного пара в этой смеси равно давлению насыщения при данной температуре.

Если влажный воздух содержит при данной температуре водяной пар в перегретом состоянии, то он будет называться ненасыщенным. Так как в нем находится не максимально возможное для данной температуры количество водяного пара, то он способен к дальнейшему увлажнению. Поэтому такой воздух используют в качестве сушильного агента в различных сушильных установках.

По закону Дальтона общее давление влажного воздуха равно сумме парциальных давлений сухого воздуха и водяного пара, входящих в его состав:

$$P = P_B + P_{II} , (6.9)$$

где: P_B – парциальное давление сухого воздуха;

P_{II} - парциальное давление водяного пара.

Максимальное значение P_{II} при данной температуре влажного воздуха t представляет собой давление насыщенного водяного пара - P_H .

Для нахождения парциального давления пара пользуются специальным прибором – гигрометром. С помощью этого прибора определяют точку росы, т.е. температуру (t_p), до которой нужно охладить при постоянном давлении воздух, чтобы он стал насыщенным. Зная точку росы, можно по таблицам определить парциальное давление пара в воздухе как давление насыщения (P_H), соответствующее точки росы t_p .

Абсолютной влажностью воздуха называется количество водяных паров, находящихся в 1 м^3 влажного воздуха. Абсолютная влажность равна плотности пара при его парциальном давлении и температуре воздуха – t_n .

Отношение абсолютной влажности ненасыщенного воздуха при данной температуре к абсолютной влажности насыщенного воздуха при той же температуре называется относительной влажностью воздуха

$$\varphi = c_n / c_H \text{ или } \varphi = c_n / c_H \cdot 100\% , (6.10)$$

Для сухого воздуха $\varphi = 0$, для ненасыщенного $\varphi < 1$, для насыщенного $\varphi = 1(100\%)$.

Если водяной пар считать как идеальный газ, то по закону Бойля-Мариотта отношение плотностей можно заменить отношением давлений. Тогда:

$$\varphi = \rho_{II} / \rho_H \text{ или } \varphi = P_{II} / P_H \cdot 100\% . (6.11)$$

Плотность влажного воздуха складывается из масс, содержащихся в 1 м^3 сухого воздуха и водяных паров:

$$\rho = \rho_B + \rho_{II} = P_B / (R_B \cdot T) + \varphi / v'' . (6.12)$$

Молекулярная масса влажного воздуха определяют по формуле:

$$\mu = 28,95 - 10,934\varphi P_H / P (6.13)$$

Значения P_H и v'' при температуре воздуха t берутся из таблицы водяного пара, ϕ – по данным психрометра, P – по барометру.

Влагосодержание – представляет собой отношение массы пара к массе сухого воздуха:

$$d = M_{\text{П}} / M_{\text{В}}, \quad (6.14)$$

где: $M_{\text{П}}$, $M_{\text{В}}$ – соответственно массы пара и сухого воздуха во влажном воздухе.

Связь между влагосодержанием с относительной влажностью:

$$d = 0,622 \phi \cdot P_H / (P - \phi \cdot P_H). \quad (6.15)$$

Газовая постоянная:

$$R = 8314/M = 8314/(28,95 - 10,934 \cdot \mu \cdot P_H/P). \quad (6.16)$$

Объем влажного воздуха, приходящегося на 1 кг сухого воздуха:

$$V_{\text{ВЛВ}} = R \cdot T/P. \quad (6.17)$$

Удельный объем влажного воздуха:

$$v = V_{\text{ВЛВ}}/(1 + d). \quad (6.17)$$

Удельная массовая теплоемкость паровоздушной смеси:

$$c_{\text{см}} = c_{\text{В}} + d \cdot c_{\text{П}}. \quad (6.18)$$

Тема 7. Термодинамические циклы.

7.1. Циклы паротурбинных установок (ПТУ).

Паротурбинная установка является основой современных тепловых и атомных электростанций. Рабочим телом в таких установках является пар какой-либо жидкости (водяной пар). Основным циклом в паротурбинной установке является цикл Ренкина. Принципиальная схема ПТУ показана на рис.7.1 и процесс получения работы происходит в следующем образом. В паровом котле (1) и в перегревателе (2) теплота горения топлива передается воде. Полученный пар поступает в турбину (3), где происходит преобразование теплоты в механическую работу, а затем в электрическую энергию в электрогенераторе (4). Отработанный пар поступает в конденсатор (5), где отдает теплоту охлаждающей воде. Полученный конденсат насосом (6) отправляется в питательный бак (7), откуда питательным насосом (8) сжимается до давления, равного в котле, и подается через подогреватель (9) в паровой котел (1).

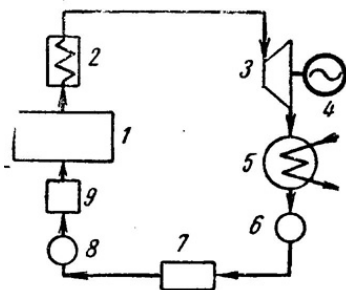


Рис. 7.1.

Рассмотрим цикл Ренкина на насыщенном паре. Схема установки отличается от предыдущей схемы тем, что в данном случае будет отсутствовать перегреватель. Поэтому на турбину будет поступать насыщенный пар. На рис.7.2,а изображен цикл Ренкина в TS-диаграмме.

Процессы: