

Лекция № 1

Общие положения. Параметры и уравнение состояния газа и газовых смесей

Теплотехника – включает технические агрегаты и устройства, предназначенные для превращения тепловой энергии в механическую работу и обратно, а также технические устройства, предназначенные для передачи и обмена тепловой энергией.

На сегодня около 90% потребляемой нами энергии составляет энергия, которую первоначально или на промежуточном этапе превращения получают и используют в виде энергии теплоты.

Теплотехнические агрегаты и устройства, предназначенные для превращения тепловой энергии в механическую работу и обратно, а также для передачи и обмена тепловой энергией представляют собой достаточно сложную термодинамическую систему. Такая система включает ряд теплотехнических процессов получения тепловой энергии, передачи энергии рабочему телу и системы теплообмена с внешней средой.

Тепловую энергию получают в результате организации специальных физико-химических процессов окисления природных энергоресурсов (нефть и продукты ее переработки, природный газ) или организации управляемых процессов радиоактивных материалов. Такие устройства в термодинамической системе нашли свое обозначение как первичные источники тепловой энергии.

В качестве рабочего тела могут использоваться различного рода материалы и предметы, обладающие особыми свойствами легко поглощать или воспринимать тепловую энергию, легко изменять свое состояние в процессе выполнения термодинамических процессов подвода или отвода тепловой энергии, легко сжиматься и расширяться под действием внутренних или внешних сил. Наиболее доступными предметами, обладающие такими свойствами, является газ, газовые смеси (воздух = азот + кислород) и пары легко испаряющихся жидкостей.

Системы теплообмена обеспечивают подвод или отвод тепловой энергии на определенном участке организации рабочего цикла теплосилового установи.

Рабочий цикл теплосилового установи представляет совокупность ряда термодинамических процессов повторяющихся в определенном порядке для обеспечения превращения тепловой энергии в механическую работу и обратно, превращения механической работы в теплоту (обратный цикл). Примером таких агрегатов и установок можно для себя представить паровые силовые установи, тепловые двигатели внутреннего сгорания. Примером тепловых установок с обратным циклом могут служить холодильные установи.

При разработке, изучении и анализе эффективности организации рабочего цикла тепловой установи (тепловой техники) необходимо иметь

информацию о текущем или конечном изменении состояния рабочего тела в результате выполнения предписанных или свободно совершаемых процессах.

Физическое состояние рабочего тела в текущем процессе характеризуется значениями параметров термодинамического состояния.

При отсутствии других внешних силовых полей (гравитационных, электромагнитных), состояние рабочего тела и характер протекания теплового процесса достаточно характеризовать параметрами: давление, удельный объем и абсолютная температура.

Температура – характеризует степень нагретости тела. С повышением температурного состояния рабочего тела возрастает средняя скорость перемещения молекул в своей среде. Температура косвенно отражает меру средней кинетической энергии движения молекул тела. С повышением температуры возрастает скорость перемещения молекул, соответственно средне кинетическая энергия движения молекулы, сила ее удара на жесткую стенку замкнутого объема и повышение давления. В термодинамике используется только абсолютная температура, температура от нуля теплового движения.

Параметром температурного состояния является абсолютная температура. Измеряется абсолютная температура в градусах Кельвина (К). За нулевую отметку температурного состояния принимается условно полное прекращение движение молекул газа. Абсолютная температура всегда только положительна.

В практике измерений чаще используется шкала температур в градусах Цельсия ($^{\circ}\text{C}$), где за нуль принята реперная точка состояния воды, тройная точка состояния воды, точка устойчивого состояния жидкой – парообразной – и твердой фазы. Интервалы отсчета на градус по шкале Кельвина и шкале Цельсия совпадают, поэтому между шкалами присутствует простая взаимосвязь соотношений $T^{\circ}\text{K} = t^{\circ}\text{C} + 273,15$. Разность температур по шкале Кельвина и шкале Цельсия остается одинаковой, т.е. $\Delta T^{\circ}\text{K} = \Delta t^{\circ}\text{C}$.

Удельный объем однородного вещества (газа, пара) выражает объем вещества занимаемый единицей его массы. Измеряется в кубических метрах на единицу массы ($\text{м}^3 / \text{кг}$)

$$v = \frac{V}{m} \quad \text{м}^3 / \text{кг}.$$

Плотность вещества (рабочего тела) определяется как масса вещества в единице объема. Плотность вещества обратно пропорциональная величина удельного объема. Измеряется в $\text{кг} / \text{м}^3$

$$\rho = \frac{1}{v} \quad \text{кг} / \text{м}^3.$$

Произведение $\rho \cdot v = 1$.

Давление – представляет собой средний результат силы ударов молекул газа на стенки сосуда, в котором находится газ. Измеряется в

ньютонах на квадратный метр поверхности, н/м^2 . 1 н/м^2 равен одному Паскалю. $1 \text{ н/м}^2 = 1 \text{ Па}$

$$P = \frac{2}{3} \cdot \frac{n}{V} \cdot \frac{m \cdot \bar{w}^2}{2} \text{ н/м}^2 (\text{Па}),$$

n – число молекул в объеме V ;

V – объем одного кг газа;

m – масса молекулы;

\bar{w} – среднеквадратичная скорость поступательного движения молекул;

$\frac{m\bar{w}^2}{2}$ – средняя кинетическая энергия движения молекулы.

Производные единицы измерения давления: Килоньютон на квадратный метр (Кн/м^2 , КПа), Меганьютон на квадратный метр (Мн/м^2 , МПа).

Внесистемные единицы измерения давления в барах.

$10^5 \text{ н/м}^2 = 1 \text{ бар} = 750,1 \text{ мм рт. ст.}$, (миллиметров ртутного столба). При выполнении всех видов термодинамических расчетов используется только абсолютное давление. Давление, зафиксированное прибором в объеме системы, выражает только избыточное давление от атмосферного давления.

Абсолютное давление отсчитывается от нуля давления, т.е. от абсолютного вакуума и отсутствия газа. Таким образом, абсолютное давление равно

$$P_{\text{абс}} = P_{\text{изб}} + P_{\text{атм}}$$

Термодинамическая система. Объектом изучения и анализа является в целом термодинамическая система. Термодинамическая система представляет собой совокупность макроскопических тел, обменивающихся энергиями между собой и с окружающей средой. Такая система называется открытой.

Термодинамическая система, условно не имеющая контакта с окружающей средой называется изолированной, замкнутой, закрытой или адиабатной.

Совокупность изменений параметров состояния термодинамической системы и ее рабочего тела при переходе из равновесного состояния в точке 1 в равновесное состояние с параметрами в точке 2 называется термодинамическим процессом.

Под равновесным состоянием следует считать состояние, при котором все параметры элементов термодинамической системы и параметры рабочего тела по всему объему на данный момент времени остаются одинаковыми, в том числе температура, удельный объем, плотность и другие физические свойства.

И сам процесс изменения параметров состояния элементов термодинамической системы, считается равновесным, если на каждый момент времени он проходит через равновесные состояния.

При анализе изменения параметров состояния термодинамической системы и термодинамического процесса, чаще всего рассматриваем, что термодинамическая система и ее рабочее тело, термодинамический процесс на каждое промежуточное состояние процесса находятся в равновесном состоянии. Именно в таком случае мы можем использовать простые и сложные уравнения зависимости и взаимосвязи процессов термодинамической системы. Равновесный процесс можно наблюдать только при бесконечно медленном изменении внешних условий и параметров состояния термодинамической системы.

В реальных условиях, под влиянием внешних сил, все изменения происходят с определенной скоростью и с нарушением равновесного состояния. То есть, реальные процессы считаются неравновесными. Однако, с учетом степени отклонения, необходимости выполнения анализа и расчетов, их можно рассматривать, как в определенной степени приближенными к равновесным процессам. Понятно, что при конечной скорости сжатия газа в цилиндре, температура и давление в разных точках его объема будет не одинаковой и процесс сам в действительности является не равновесным. Однако, для установления взаимосвязи и определения конечных параметров в процессе термодинамического перехода, с определенной точностью будем считать его как равновесный процесс перехода из одного равновесного состояния в другое равновесное состояние.

Каждое промежуточное равновесное состояние термодинамической системы можно представлять графически точкой в соответствующих координатах. Совокупность точек промежуточного состояния выльется в графическую линию или кривую, которая и будет отражать характер равновесного термодинамического процесса.

С учетом частного характера протекания термодинамического процесса различают следующие процессы:

Изохорный процесс – процесс теплообмена, протекающий при постоянном объеме, $V = const$

Изобарный процесс – процесс теплообмена, протекающий при постоянном давлении, $P = const$

Изотермический процесс – процесс теплообмена, протекающий при постоянной температуре, $T = const$

Термодинамический процесс, протекающий без теплообмена с внешней средой, называется адиабатным, $dQ = 0$.

При протекании термодинамического процесса, участвующие тела обмениваются энергией. Обмен энергией осуществляется двумя способами.

1. Обмен энергией происходит под действием наличия разности температурного состояния при непосредственном контакте. В таких случаях, энергия в виде теплоты передается от более нагретого тела (с более высоким энергетическим потенциалом) к менее нагретому (с более низким энергетическим потенциалом).

Количество энергии измеряется в джоулях. Джоуль – это работа, которая совершается силой в один ньютон при перемещении на пути 1 метр, 1 джоуль = 1 нм.

Количество энергии, в виде теплоты, переданное рабочему телу – называют подводенной теплотой.

Количество энергии, в виде теплоты, отданное рабочим телом менее нагретому телу – называют отведенной теплотой.

Подведенная теплота считается положительной.

Отведенная теплота считается отрицательной.

Произвольное количество теплоты участвующее в процессе обозначается индексом Q , джоулей, удельное количество теплоты обозначается индексом q , в джоулях на единицу массы, джоуль /кг.

2. Передача энергии под действием наличия силового поля – называется передача энергии в виде работы.

Количество энергии, переданное в форме работы, называют совершенной работой.

Работа, совершенная над рабочим телом (сжатие) считается отрицательной.

Работа, совершенная рабочим телом (перемещение на участке расширения) под действием силового поля рабочего тела считается положительной.

Произвольное количество работы совершенной в термодинамическом процессе обозначается индексом L , в джоулях, удельное количество работы совершенной в термодинамическом процессе обозначается индексом l , дж/кг.

Уравнение состояния идеальных газов и газовых смесей. Согласно молекулярно-кинетической теории движения молекул удельное давление равно

$$P = \frac{2}{3} \cdot \frac{n}{v} \cdot \frac{m\bar{w}^2}{2} \text{ н/м}^2, \text{ откуда}$$

$$P \cdot v = \frac{2}{3} \cdot n \cdot \frac{m\bar{w}^2}{2},$$

где P – абсолютное давление газа;

n – число молекул в объеме V ;

v – объем одного кг газа;

m – масса молекулы;

\bar{w} – среднеквадратичная скорость поступательного движения молекул;

$\frac{m\bar{w}^2}{2}$ – средняя кинетическая энергия движения молекулы.

При одинаковых значениях температуры значение $\frac{mw^2}{2}$ величина постоянная и пропорциональна значению температуры $\frac{mw^2}{2} = BT$,

где B – коэффициент пропорциональности.

Таким образом, $P \cdot v = \frac{2}{3} \cdot n \cdot BT$ и $\frac{P \cdot v}{T} = \frac{2}{3} \cdot nB = const$.

Обозначим произведение, $\frac{2}{3} \cdot nB = const$ через R – как, постоянную величину для газа, и выясним ее физическое содержание.

Анализ зависимостей параметров состояния при изобарном процессе перехода из точки 1 в точку состояния 2 с произвольной массой газа m в кг, $PV_1 = mRT_1$ и $PV_2 = mRT_2$, показывает

$$R = \frac{P(V_2 - V_1)}{m(T_2 - T_1)} \quad \frac{нм}{кг \cdot град}.$$

Таким образом, постоянная величина для одного кг газа – R выражает работу, которая совершается единицей массы газа в изобарном процессе при повышении его температурного состояния на один градус.

В дальнейшем обозначается и используется при выполнении расчетов и читается как газовая постоянная газа.

Рассматривая уравнение состояния относительно одного киломоля

$$PV_m = \mu RT \quad \text{получаем}$$

$\mu R = \frac{PV_m}{T} = const$, произведение μR величина постоянная и при

нормальных физических условиях для всех идеальных газов всегда равна значению

$$\mu R = \frac{101325 \cdot 22,4}{273,15} = 8314,2 \frac{дж}{кмоль \cdot град}$$

это универсальная газовая постоянная для одного киломоля всех идеальных газов.

22,4 – объем одного киломоля для всех идеальных газов при нормальных физических условиях.

Таким образом, универсальная газовая постоянная μR – это работа, которая совершается одним киломолем газа в изобарном процессе при изменении температуры на один градус.

В практике ее значение широко используется для определения молекулярной массы газа или газовой постоянной для 1 кг газа.

Ниже представлена таблица обозначения, молекулярная масса, плотность, удельный объем и газовая постоянная для отдельных газов

Таблица 1
Обозначение и физические свойства газов при нормальных физических условиях

Раб тело(газ)	Обозна чение	Молек масса	Плотность ρ	Газовая постоянная
Азот	N ₂	28,02	1,25	296,8
Кислород	O ₂	32	1,429	260
Водород	H ₂	2,016	0,09	4124,3
Оксид углерода	CO	28	1,25	296,8
Диоксид углерода	CO ₂	44	1,977	189,9
Водяной пар	H ₂ O	18,016	0,804	461,6
Воздух	N ₂ + O ₂	28,96	1,293	287,0

Газовые смеси. В практике, в качестве рабочего тела чаще приходится использовать смеси газов. Смеси газов представляют собой механическое смешение отдельных газов, не вступающих между собой в химические реакции с образованием новых соединений. Самым близким и наглядным примером смеси можно привести воздух – как газовая смесь, состоящая из 20,8% кислорода и 79,2 % азота, по объему. Газовую смесь представляют отработавшие газы двигателей внутреннего сгорания, образовавшиеся в результате высокотемпературного окисления углеводородных соединений в рабочем объеме цилиндра теплового двигателя.

В составе смеси содержится диоксид углерода–CO₂, оксид углерода–CO, водяной пар–H₂O, углеводороды – CH₄, кислород – O₂, азот –N₂.

При повышенных значениях температуры, газовые смеси хорошо подчиняются уравнению Клайперона – Менделеева, для определения параметров текущего состояния

$$PV = mRT.$$

Понятно, что для использования приведенной зависимости прежде необходимо установить значение условной (кажущейся) средней молекулярной массы смеси – $\mu_{см}$ и ее условной газовой постоянной – $R_{см}$, с учетом состава смеси и количественного соотношения.

Количественный и качественный состав газовой смеси обычно задается:

– массовыми долями - как отношение массы отдельного компонента в составе смеси к общей массе смеси.

$$g_1 = \frac{m_1}{m_{см}} \quad g_2 = \frac{m_2}{m_{см}} \quad g_3 = \frac{m_3}{m_{см}} \quad g_i = \frac{m_i}{m_{см}}$$

Сумма массовых долей рассматриваемой газовой смеси всегда должна быть равной единице

$$\sum_1^n g_i = g_1 + g_2 + g_3 + \dots + g_n = 1$$

Сумма масс отдельных газов в составе газовой смеси всегда должна быть равна общей массе газовой смеси

$$m_{см} = m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n = \sum_1^n m_i ;$$

– объемными долями - как отношение занимаемого парциального объема отдельного компонента в составе смеси, при сохранении давления и температуры, к общему объему занимаемого газовой смесью

$$r_1 = \frac{V_1}{V_{см}} ; \quad r_2 = \frac{V_2}{V_{см}} ; \quad r_3 = \frac{V_3}{V_{см}} ; \quad r_i = \frac{V_i}{V_{см}} ;$$

Парциальный объем газа V_i – это объем, который занимал бы этот газ в составе смеси при неизменной той же температуре и давлении.

$$V_1 + V_2 + V_3 = V_{см} = \sum_1^3 V_i .$$

Сумма объемных долей рассматриваемой газовой смеси всегда должна быть равной единице

$$r_1 + r_2 + r_3 = \sum_1^n r_i = 1$$

Количественный и качественный состав смеси можно задавать и мольными долями – как отношение количества молей каждого газа к общему количеству молей газовой смеси. Условно пока, мольную долю числа молей отдельного компонента от общего числа молей газовой смеси обозначим через μ_i , тогда

$$\mu_1 = \frac{M_1}{M_{см}} ; \quad \mu_2 = \frac{M_2}{M_{см}} ; \quad \mu_3 = \frac{M_3}{M_{см}} ; \quad \mu_i = \frac{M_i}{M_{см}} .$$

Согласно закону Авогадро, один киломоль любого газа при нормальных физических условиях занимает один и тот же объем, равный

$V_m = 22,4 \text{ м}^3$, плотность газа пропорциональна его молекулярной массе, соответственно

$$\frac{\mu_i}{\mu_{см}} = \frac{\rho_i}{\rho_{см}} \quad \text{или} \quad \frac{M_i}{M_{см}} = \frac{V_i}{V_{см}} = r_i$$

Следовательно, получаем, задание газовой смеси объемными долями равнозначно заданию ее состава мольными долями $\mu_i = r_i$.

На основании зависимостей закона Авогадро и уравнения Клайперона можно установить следующую зависимость

$$\frac{\rho_i}{\rho} = \frac{\mu_i}{\mu} = \frac{V}{V_i} = \frac{R}{R_i}$$

Тогда согласно ранее установленному соотношению можно записать

$$g_i = \frac{m_i}{m_{см}} = \frac{\rho_i V_i}{\rho_{см} V_{см}} = \frac{\rho_i}{\rho_{см}} \cdot r_i.$$

Соответственно

$$g_i = r_i \cdot \frac{\rho_i}{\rho_{см}} = r_i \cdot \frac{\mu_i}{\mu_{см}} = r \cdot \frac{R_{см}}{R_i}$$

и

$$r_i = g_i \cdot \frac{R_i}{R_{см}} = g_i \cdot \frac{\mu_{см}}{\mu_i} = g_i \cdot \frac{\rho_{см}}{\rho_i}$$

Газовая постоянная для смеси газов определяется из суммы произведений массовой доли отдельного газа на его газовую постоянную $g_i \cdot R_i$, как доля каждой составляющей газовой смеси. То есть, как количественная составляющая работы отдельного компонента в суммарной работе, которую может совершить единица массы газовой смеси при ее изобарном нагреве на один градус.

$$R_{см} = \sum_1^n g_i \cdot R_i = g_1 R_1 + g_2 R_2 + g_3 R_3 + \dots.$$

Средняя молекулярная масса для газовой смеси представляется как условная величина, которая относится к условно однородному газу с числом молекул и молекулярной массой абсолютно отвечает числу молекул и массе газовой смеси

$$\mu_{см} = r_1 \mu_1 + r_2 \mu_2 + \dots + r_n \mu_n = \sum_1^n r_i \mu_i$$

или

$$\mu_{см} = \frac{8314,2}{R_{см}}.$$

Парциальное давление – P_i определяется из соотношения

$$P_i \cdot V = P_{см} \cdot V_i$$

отсюда

$$P_i = P_{см} \cdot \frac{V_i}{V_{см}} = P_{см} \cdot r_i = P_{см} \cdot g_i \cdot \frac{\mu_{см}}{\mu_i}$$