

1 ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

1.1 Параметры состояния рабочего тела

Удельный объем (v) тела представляет собой объем единицы его массы, $\text{м}^3/\text{кг}$.

$$v = \frac{V}{m}, \quad (1)$$

где V - объем, занимаемый телом, м^3 ;

m – масса тела, кг .

Плотность (ρ) - величина, обратная удельному объему, представляет собой массу единицы объема, $\text{кг}/\text{м}^3$.

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{m}{V}. \quad (2)$$

Давление (P) - сила, приходящаяся на единицу площади поверхности, единицы измерения – ньютон на квадратный метр, паскаль. Эта единица очень мала. Для практических целей удобнее использовать более крупные величины:

$$1 \text{ кПа} = 10^3 \text{ Па}; 1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па}; 1 \text{ ГПа} = 10^9 \text{ Па}; 1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}.$$

На практике часто используют внесистемные единицы:

$$1 \text{ ат} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 735,6 \text{ мм рт. ст.} = 10\,000 \text{ мм вод. ст.} = 98,0665 \text{ кПа};$$

$$1 \text{ атм} = 760 \text{ мм рт. ст.} = 10\,332 \text{ мм вод. ст.} = 101,325 \text{ кПа};$$

$$1 \text{ мм вод. ст.} = 1 \text{ кгс/м}^2 = 9,81 \text{ Па};$$

$$1 \text{ мм рт. ст.} = 133,3 \text{ Па}.$$

Термодинамическим параметром является абсолютное давление $P_{\text{абс}}$, которое определяется из соотношений:

$$P_{\text{абс}} = P_{\text{атм}} + P_{\text{изб}}, \quad (3)$$

$$P_{\text{абс}} = P_{\text{атм}} - P_{\text{вак}}, \quad (4)$$

где $P_{\text{атм}}$ — атмосферное или барометрическое давление, измеряемое барометром;

$P_{\text{изб}}$ — избыточное давление, измеряемое манометром;

$P_{\text{вак}}$ — вакуумметрическое давление (разряжение), измеряемое вакуумметром.

При измерении давления высотой ртутного столба следует иметь в виду, что показание прибора зависит от температуры. Это учитывается приведением высоты столба ртути к 0°C по следующему соотношению:

$$P_0 = P_t (1 - 0,000172 t), \quad (5)$$

где P_0 - показание прибора, приведенное к 0°C , мм рт. ст.;

P_t - действительная высота ртутного столба при температуре воздуха $t^\circ \text{C}$, мм рт. ст.;

0,000172 - коэффициент объемного расширения ртути.

При удалении от поверхности земли атмосферное давление понижается. В пределах тропосферы (до высоты 11000 м) закон падения давления выражается формулой

$$P = P_0 \left(1 - \frac{h}{44300} \right)^{5,256}, \quad (6)$$

где P - барометрическое давление в верхних слоях атмосферы при температуре ртути 0°C , мм рт. ст.;

P_0 - барометрическое давление на уровне моря при температуре ртути 0°C , мм рт. ст.;

h - высота над уровнем моря, м.

Температура характеризует степень нагретости тела и является количественной мерой интенсивности теплового движения молекул. Ее измеряют либо по термодинамической температурной шкале, либо по международной практической температурной шкале. В

качестве точки отсчета взята тройная точка воды (температура, при которой все три фазы воды - твердая, жидкая и газообразная - находятся в равновесии), которой присвоены значения 273,16 К и 0,01 °С. Нижним пределом шкалы является абсолютный нуль (температура, при которой прекращается тепловое движение молекул).

Температуру по международной практической температурной шкале, отсчитываемую от 0 °С, обозначают через t (единица измерения – градус Цельсия), а температуру по абсолютной шкале, отсчитываемую от температуры абсолютного нуля, обозначают через T и называют абсолютной температурой (единица измерения - кельвин).

Зависимость между абсолютной температурой и температурой по шкале Цельсия следующая:

$$T = t + 273,15. \quad (7)$$

Для измерения температуры применяют также шкалу Фаренгейта (°F), Реомюра (°R), Ренкина (°Ra). Соотношения между ними:

$$t \text{ } ^\circ\text{F} = 1,8 t \text{ } ^\circ\text{C} + 32; \quad t \text{ } ^\circ\text{R} = 0,8 t \text{ } ^\circ\text{C}; \quad t \text{ } ^\circ\text{Ra} = 1,8 t \text{ } ^\circ\text{C} + 273. \quad (8)$$

Под нормальными физическими условиями понимается состояние рабочего вещества при давлении $P_{\text{абс}} = 760$ мм рт. ст. и температуре 0 °С. Если объем газа приведен к нормальным условиям, то его принято обозначать V_n .

Примеры решения задач

1 Давление воздуха по ртутному барометру равно 770 мм при 0 °С. Выразить это давление в барах и паскалях.

Решение:

$$1 \text{ мм рт. ст.} = 133,3 \text{ Па}; 770 \text{ мм рт. ст.} = 102700 \text{ Па} = 1,027 \text{ бар.}$$

2 Определить абсолютное давление пара в котле, если манометр показывает $P=1,3$ бар, а атмосферное давление по ртутному барометру составляет 680 мм при $t = 25^\circ\text{C}$.

Решение:

Показание барометра получено при температуре $t = 25^\circ\text{C}$. Это показание необходимо привести к 0°C по уравнению (5):

$$P_0 = P_t (1 - 0,000172 t) = 680 \cdot 0,9957 = 677,1 \text{ мм рт. ст.}$$

Абсолютное давление пара в котле по формуле (3)

$$P_{\text{абс}} = 130000 + 677,1 \cdot 133,3 = 0,22 \text{ МПа.}$$

3 Давление в паровом котле $P = 0,4$ бар при барометрическом давлении 725 мм рт. ст. Чему будет равно избыточное давление в котле, если показание барометра повысится до 785 мм рт. ст., а состояние пара в котле останется прежним? Барометрическое давление приведено к 0°C .

Решение:

Абсолютное давление в котле

$$P_{\text{абс}} = 400000 + 725 \cdot 133,3 = 136642 \text{ Па.}$$

Избыточное давление при показании барометра 785 мм рт. ст.

$$P_{\text{изб}} = 136642 - 785 \cdot 133,3 = 32000 \text{ Па.}$$

4 Ртутный вакуумметр, присоединенный к сосуду, показывает разрежение 420 мм при температуре ртути в вакуумметре $t = 20^\circ\text{C}$. Давление атмосферы по ртутному барометру 768 мм при температуре $t = 18^\circ\text{C}$. Определить абсолютное давление в сосуде.

Решение:

Приводим показания вакуумметра и барометра к температуре ртути 0 °С по уравнению (5):

$$P_{\text{вак}} = 420 (1 - 0,000172 \cdot 20) = 418,5 \text{ мм рт. ст.}$$

$$P_{\text{атм}} = 768 (1 - 0,000172 \cdot 18) = 765,6 \text{ мм рт. ст.}$$

Абсолютное давление в сосуде по формуле (4)

$$P_{\text{абс}} = 765,6 - 418,5 = 347,1 \text{ мм рт. ст.} = 46,3 \text{ кПа.}$$

5 Водяной пар перегрет на 45°С. Чему соответствует этот перегрев по термометру Фаренгейта?

Решение:

При переводе разности температур, выраженной градусами шкалы Цельсия, в градусы Фаренгейта и наоборот надо исходить только из цены деления того и другого термометров. Поэтому формула (8) принимает следующий вид:

$$\Delta t^{\circ}\text{F} = 1,8 \cdot \Delta t^{\circ}\text{C} + 32.$$

Следовательно, для нашего случая

$$\Delta t^{\circ}\text{F} = 1,8 \cdot 45 + 32 = 113^{\circ}\text{F}.$$

Задачи

1 Масса 1 м³ метана при определенных условиях составляет 0,7 кг. Определить плотность и удельный объем метана при этих условиях.

$$\text{Ответ: } \rho = 0,7 \text{ кг/м}^3; v = 1,429 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

2 Плотность воздуха при определенных условиях равна 1,293 кг/м³. Определить удельный объем воздуха при этих условиях.

$$\text{Ответ: } v = 0,773 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

3 В сосуде объемом $0,9 \text{ м}^3$ находится $1,5 \text{ кг}$ окиси углерода. Определить удельный объем и плотность окиси углерода при указанных условиях.

Ответ: $v = 0,6 \text{ м}^3/\text{кг}$; $\rho = 1,67 \text{ кг/м}^3$.

4 Давление воздуха, измеренное ртутным барометром, равно 765 мм при температуре ртути 20°C . Выразить давление в барах.

Ответ: $P = 1,02 \text{ бар}$.

5 Определить абсолютное давление газа в сосуде, если показание ртутного манометра равно 500 мм рт. ст. , а атмосферное давление по ртутному барометру составляет 750 мм . Температура воздуха в месте установки приборов равна 0°C .

Ответ: $P_{\text{абс}} = 1,667 \text{ бар} = 0,1667 \text{ МПа}$.

6 Определить абсолютное давление в паровом котле, если манометр показывает $2,45 \text{ бар}$, а атмосферное давление по ртутному барометру составляет 700 мм при $t = 20^\circ\text{C}$.

Ответ: $P = 3,38 \text{ бар}$.

7 Какой высоте водяного столба соответствует 1 мм рт. ст. ?

Ответ: $h = 13,6 \text{ мм вод. ст.}$

8 Какой высоте водяного столба соответствует давление равное 1 кгс/м^2 ?

Ответ: $h = 1 \text{ мм вод. ст.}$

9 Определить абсолютное давление в конденсаторе паровой турбины, если показание присоединенного к нему ртутного вакуумметра равно 705 мм рт. ст. , а показание ртутного барометра, приведенное к 0°C , 747 мм . Температура воздуха в месте установки приборов $t = 20^\circ\text{C}$.

Ответ: $P = 5900 \text{ Па}$.

10 Разрежение в газоходе парового котла измеряется тягомером с наклонной трубкой. Угол наклона трубки $\alpha = 30^\circ$. Длина столба воды, отсчитанная по шкале, 160 мм. Определить абсолютное давление газов, если показание ртутного барометра, приведенное к 0°C составляет, 740 мм.

Ответ: $P = 734,1$ мм рт. ст.

11 Для предупреждения испарения ртути, пары которой оказывают вредное действие на человеческий организм, обычно при пользовании ртутными манометрами над уровнем ртути наливают слой воды. Определить абсолютное давление в сосуде, если разность столбов ртути в U-образном манометре составляет 580 мм при температуре ртути 25°C , а высота столба воды над ртутью - 150 мм. Атмосферное давление по ртутному барометру равно 770 мм при температуре 25°C .

Ответ: $P = 1,81$ бар.

12 В трубке вакуумметра высота столбика ртути составляет 570 мм при температуре ртути 20°C . Над ртутью находится столбик воды высотой 37 мм. Барометрическое давление воздуха составляет 728 мм рт. ст. при 15°C . Определить абсолютное давление в сосуде.

Ответ: $P = 155,4$ мм рт. ст.

13 Для измерения расхода жидкостей и газов используют дроссельные диафрагмы. Вследствие дросселирования жидкости при прохождении через диафрагму давление ее за диафрагмой всегда меньше, чем перед ней. По разности давлений перед и за диафрагмой, измеряемой дифференциальным U-образным манометром, можно определить массовый расход жидкости (килограмм в секунду) по формуле

$$G = a f \sqrt{2(P_1 - P_2) \rho},$$

где a - коэффициент расхода, определяемый экспериментально: при ламинарном режиме - $a = 0,5$; при турбулентном – $a = 0,5 - 0,82$;

f - площадь входного отверстия диафрагмы, м^2 ;

$P_1 - P_2$ - перепад давления на диафрагме, Па;

ρ - плотность жидкости, протекающей по трубе, кг/м^3 .

Определить массовый расход воды, измеренный при помощи дроссельного устройства, если $a = 0,8$; показание дифференциального манометра 84 мм рт. ст.; $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, а диаметр входного отверстия диафрагмы 10 мм.

Ответ: $G = 1,89 \text{ кг/с}$.

14 Присоединенный к газоходу парового котла тягомер показывает разрежение, равное 80 мм вод. ст. Определить абсолютное давление дымовых газов, если показание барометра при температуре 0°C равно 770 мм рт. ст.

Ответ: $P = 764,1 \text{ мм рт. ст.}$

15 Тягомер показывает разрежение в газоходе, равное 42 мм вод. ст. Атмосферное давление по ртутному барометру 757 мм рт. ст. при $t = 15^\circ\text{C}$. Определить абсолютное давление дымовых газов.

Ответ: $P = 751,95 \text{ мм рт. ст.}$

16 Определить абсолютное давление в газоходе котельного агрегата при помощи тягомера с наклонной трубкой. Жидкость, используемая в тягомере, спирт с плотностью $\rho = 800 \text{ кг/м}^3$. Отсчет по наклонной шкале 200 мм. Угол наклона трубки $\alpha = 30^\circ$. Барометрическое давление 745 мм рт. ст. (приведено к 0°C).

Ответ: $P = 739 \text{ мм рт. ст.}$

17 Температура пара, выходящего из перегревателя парового котла, равна 950°F . Перевести эту температуру в $^\circ\text{C}$.

Ответ: $t = 510^\circ\text{C}$.

18 Какая температура в градусах Фаренгейта соответствует абсолютному нулю?

Ответ: $t = - 459^{\circ}\text{F}$.

19 Определить барометрическое давление на высоте 9500 м, если известно, что давление на уровне моря составляет 740 мм рт. ст. при 15°C .

Ответ: $P = 0,276 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

20 Барометр, находящийся при 0°C , показывает, что на уровне моря давление составляет 757 мм рт. ст. Барометр, установленный на борту самолета, показывает давление в 3,7 раза меньше давления на уровне моря. Оценить высоту полета самолета.

Ответ: $h = 9750 \text{ м}$.

21 Манометр показывает, что давление в баллоне, заполненном кислородом, составляет 40 ат. Определить избыточное давление кислорода в баллоне при подъеме его на высоту 6000 м, если барометрическое давление на уровне моря 770 мм рт. ст. при температуре окружающей среды 30°C .

Ответ: $P = 3,97 \text{ МПа}$.

22 Определить давление на нижнее днище контейнера ракеты, установленной на подводной лодке, если указанное днище находится на глубине 15,5 м, а давление атмосферы, измеренное ртутным барометром при температуре 20°C , составляет 755 мм рт. ст.

Ответ: $P = 0,253 \text{ МПа}$.

23 В помещении, где установлена барокамера, давление по водяному манометру 50 мм вод. ст. Барометр, установленный вне помещения, показывает 750 мм рт. ст. при 30°C . В барокамере создан вакуум 180 мм рт. ст. Найти абсолютное давление в барокамере.

Ответ: $P = 76 \text{ кПа}$.