

небольшая часть общего количества газовых частиц: на высоте 300 км — около 0,1 %, на высоте 800 км — меньше 10 %. Только выше 2000—3000 км большинство газовых частиц (по всей вероятности, водородных атомов) ионизовано. Такая сильно разреженная (около 1000 частиц в 1 см<sup>3</sup>) ионосфера простирается до высоты 20—30 тыс. км, где она постепенно переходит в межпланетный газ с числом частиц около 100 в 1 см<sup>3</sup>.

Количество ионов атомного азота в слое 400—800 км не превышает 10 % количества ионов O<sup>+</sup>, поэтому нет оснований предполагать, что и количество нейтральных атомов азота составляет значительную часть от числа атомов кислорода. Процесс же гравитационного разделения препятствует появлению в больших количествах тяжелых молекул азота. Остается, таким образом, последнее предположение: преобладающий газ в слое 300—1000 км — атомный кислород (O) с небольшой примесью атомов азота. Относительная молекулярная масса атомного кислорода почти в 2 раза меньше относительной молекулярной массы воздуха ниже уровня 100 км. Вследствие этого относительная молекулярная масса воздуха выше 100 км уменьшается и на больших высотах приближается к 16 кг/кмоль, что иллюстрируют следующие данные:

z км...	225	250	275	300	325	350	375	400	450	500
μ кг/кмоль...	21,28	20,15	19,22	18,50	17,92	17,47	17,12	16,84	16,43	16,1

Подчеркнем, что здесь рассмотрен относительный (процентный) состав воздуха. Абсолютное же содержание всех атмосферных газов убывает с высотой.

### 3 Уравнение состояния сухого воздуха

Состояние каждого из атмосферных газов характеризуется значениями трех величин: температуры, давления и плотности (или удельного объема). Эти величины всегда связаны между собой некоторым уравнением, которое носит название *уравнения состояния газа*.

Для каждого газа существует так называемая *критическая температура*  $T_{кр}$ . Если температура газа выше критической ( $T > T_{кр}$ ), то ни при каком давлении газ не может быть переведен в жидкое или твердое состояние, т. е. при  $T > T_{кр}$  возможно только газообразное состояние вещества. Приводим значения критических температур атмосферных газов:

Газ . . . . .	He	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
$T_{кр}$ °C . .	—268	—240	—147	—119	31	374

Из этих данных следует, что критические температуры всех атмосферных газов, кроме углекислого газа и водяного пара, очень

низкие. Температуры, которые наблюдаются в атмосфере на всех высотах, значительно выше критических температур этих газов. Углекислый газ, хотя и имеет критическую температуру выше, чем обычно наблюдаемые температуры воздуха, далек от состояния насыщения, поскольку его парциальное давление в условиях атмосферы мало.

По своим физическим свойствам газ тем ближе к идеальному, чем выше его температура по сравнению с критической, а также чем меньше его давление по сравнению с давлением насыщения.

При условиях, наблюдающихся в атмосфере, основные газы, входящие в состав воздуха, ведут себя практически как идеальные газы. Поэтому уравнение состояния какого-либо газа имеет вид уравнения состояния идеального газа:

$$p_i v_i = R_i T, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (3.1)$$

где  $p_i$  — парциальное давление,  $T$  — температура,  $v_i$  — удельный объем;  $R_i$  — удельная газовая постоянная  $i$ -го газа,  $n$  — число газов, составляющих механическую смесь.

Удельная газовая постоянная  $R_i$  связана с универсальной газовой постоянной  $R^* = 8,31441 \cdot 10^3$  Дж/(кмоль · К) следующим соотношением:

$$R_i = R^* / \mu_i, \quad (3.2)$$

где  $\mu_i$  — относительная молекулярная масса  $i$ -го газа.

Согласно закону Дальтона, поведение каждого газа в механической смеси не зависит от присутствия других газов, а общее давление смеси равно сумме парциальных давлений, т. е.

$$p = \sum_{i=1}^n p_i. \quad (3.3)$$

Пусть масса сухого воздуха равна единице, а масса  $i$ -го газа  $m_i$ . Тогда

$$v_i = v / m_i, \quad (3.4)$$

где  $v$  — удельный объем сухого воздуха.

Подставляя  $v_i$  по (3.4) в формулу (3.1) и суммируя уравнения (3.1), получим

$$v \sum_{i=1}^n p_i = T \sum_{i=1}^n m_i R_i$$

или, согласно (3.3),

$$pv = R_c T, \quad (3.5)$$

где

$$R_c = \sum_{i=1}^n m_i R_i \quad (3.6)$$

— удельная газовая постоянная сухого воздуха.

Уравнение (3.5) и представляет собой *уравнение состояния сухого воздуха*.

Таким образом, уравнение состояния сухого воздуха имеет тот же вид, что и уравнение состояния идеального газа. При этом удельная газовая постоянная воздуха определяется как среднее взвешенное из парциальных газовых постоянных по формуле (3.6).

С учетом формулы (3.2) и данных о составе воздуха (см. п. 1) получаем следующее значение удельной газовой постоянной сухого воздуха:

$$R_c = 287 \text{ м}^2/(\text{с}^2 \cdot \text{К}) = 287 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Относительную молекулярную массу сухого воздуха по углеродной шкале можно получить при известных  $R_c$  и  $R^*$  по соотношению

$$\mu_c = R^*/R_c = 28,9645 \text{ кг/кмоль}. \quad (3.7)$$

Если вместо удельного объема  $v$  в уравнение (3.5) ввести плотность  $\rho$ , связанную с  $v$  соотношением  $\rho = 1/v$ , то оно примет вид

$$p = R_c \rho T. \quad (3.8)$$

Наряду с таким видом уравнения состояния широкое распространение (особенно при изучении верхних слоев атмосферы) получила другая форма записи его. Эта форма легко получается из уравнения (3.5), если левую и правую части его умножить на  $\mu_c$ :

$$\rho \mu_c v = \mu_c R_c T \text{ или } \rho V = R^* T, \quad (3.9)$$

где  $V = \mu_c v$  — объем моля воздуха. При фиксированных  $\rho$  и  $T$  объем  $V$ , согласно (3.9), для всех газов одинаков (например, при  $T = 0^\circ \text{C}$  и  $\rho = 1013,2 \text{ гПа}$  объем  $V_0 = 22,41 \text{ м}^3/\text{кмоль}$ ).

Если теперь разделить левую и правую части (3.9) на число молекул воздуха в одном моле ( $N$ ), то получим

$$\rho \frac{V}{N} = \frac{R^*}{N} T \text{ или } p = k \frac{N}{V} T. \quad (3.10)$$

Здесь введено обозначение

$$k = R^*/N. \quad (3.11)$$

Так как число молекул в одном моле — число Авогадро — для всех газов одинаково ( $N = 6,02 \cdot 10^{26} \text{ кмоль}^{-1}$ ), то величина  $k$  представляет собой тоже универсальную постоянную, называемую постоянной Больцмана:

$$k = 1,38 \cdot 10^{-16} \text{ эрг/К} = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}.$$

Следовательно, уравнение состояния воздуха (равно как и любого другого идеального газа) можно записать также в следующем виде:

$$p = knT, \quad (3.12)$$

где  $n = N/V$  — число молекул воздуха в  $1 \text{ м}^3$ , которое, как следует из (3.12), при фиксированных  $p$  и  $T$  одинаково для всех газов (при  $T = 0^\circ\text{C}$  и  $p = 1013,2 \text{ гПа}$ ,  $n = 2,687 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ ).

Из уравнений (3.8) и (3.12) следует

$$R_c \rho = \frac{R^*}{\mu_c} \rho = \frac{kN}{\mu_c} \rho = kn,$$

откуда

$$\rho = n \frac{\mu_c}{N} = nm, \quad (3.13)$$

где  $m = \mu_c/N$  — средняя масса одной молекулы воздуха.

#### 4 Уравнение состояния влажного воздуха

Влажный воздух представляет собой механическую смесь сухого воздуха и водяного пара. Так как критическая температура водяного пара ( $T_{кр} = 374^\circ\text{C}$ ) выше наблюдаемых в атмосфере температур, то он в реальных условиях атмосферы может переходить в жидкое и твердое состояния (конденсироваться и сублимироваться).

Теория фазовых переходов водяного пара детально рассматривается в разделе IV. Здесь отметим только, что условие  $T < T_{кр}$  необходимо, но недостаточно для перехода пара в жидкое и твердое состояния. Для начала конденсации водяного пара необходимо также, чтобы он достиг состояния насыщения.

Так как реально наблюдаемые температуры в атмосфере ниже критической температуры водяного пара, его физические свойства, вообще говоря, могут отличаться от свойств идеального газа. Однако экспериментальным путем установлено, что физические свойства водяного пара практически близки к свойствам идеального газа. По этой причине уравнение состояния водяного пара с достаточной степенью точности можно записать в виде

$$e v_n = R_n T, \quad (4.1)$$

где  $e$  — парциальное давление водяного пара,  $v_n$  — удельный объем,  $R_n$  — удельная газовая постоянная водяного пара, равная  $R_n =$