

нием толщины слоя изменяется и величина  $\bar{T}$ . В случае же изотермической атмосферы температура является независимой (задаваемой) величиной. Поскольку барометрическая формула реальной атмосферы является показательной функцией, на основе ее анализа можно сделать такие же выводы относительно закономерностей изменения давления с высотой, какие были сделаны в случае изотермической атмосферы. Роль температуры  $T_0$  в реальной атмосфере играет средняя барометрическая температура  $\bar{T}$ . Все выводы в случае реальной атмосферы относятся к слою *конечной толщины*. Поэтому вывод о бесконечной протяженности атмосферы, сделанный на основе формулы (3.12), здесь отпадает.

Если необходимо учесть влияние влажности на плотность воздуха и распределение давления по высоте, то в формулах (3.22) — (3.25) средняя барометрическая температура  $\bar{T}$  должна быть заменена средней виртуальной барометрической температурой  $\bar{T}_v$ .

#### 4 Барическая ступень

Для приближенной оценки высоты по известной разности давлений или, наоборот, для оценки давления по заданной разности высот на практике удобно пользоваться понятием «барическая ступень».

*Барической ступенью* называется такая высота, на которую нужно подняться с исходного уровня, чтобы давление понизилось на 1 гПа. Обозначим ее через  $h$ . Единица барической ступени — м/гПа. Формулу для барической ступени легко получить, если воспользоваться следующими рассуждениями. При увеличении высоты на  $dz$  давление понижается на  $-dp$ . Для того, чтобы давление уменьшилось на 1 гПа, необходимо подняться на высоту

$$h = dz/(-dp) = -dz/dp. \quad (4.1)$$

С учетом уравнения (2.5) эта формула принимает вид

$$h = 1/g\rho. \quad (4.2)$$

Формула (4.2) показывает, что  $h$  зависит только от плотности воздуха (не считая зависимости от  $g$ , которое изменяется в узких пределах). Чем меньше плотность воздуха, тем больше барическая ступень, и наоборот. Исследуем зависимость барической ступени от высоты (давления) и температуры. С увеличением высоты плотность воздуха, как было показано в п. 3, уменьшается, если исключить из рассмотрения тонкий приземный слой, в котором плотность может и возрастать с высотой (при  $\gamma > \gamma_a$ ). Уменьшение плотности приводит к *росту барической ступени при увеличении*

высоты. Заменяв в формуле (4.2) плотность  $\rho$  по уравнению (4.12) главы 1, получим

$$h = \frac{H_0}{\rho} (1 + \alpha t_v), \quad (4.3)$$

где  $H_0 = 273R_c/g \approx 8000$  м.

Если сравниваются барические ступени на одной и той же изобарической поверхности ( $p = \text{const}$ ) в двух воздушных массах (теплой и холодной), то, согласно (4.3), *барическая ступень в теплой массе ( $h_T$ ) больше барической ступени в холодной массе ( $h_X$ )*, т. е.  $h_T > h_X$ . Чем меньше барическая ступень, тем быстрее падает с высотой давление. Значения барической ступени при разных температурах и давлениях приведены в табл. 3.1.

**Таблица 3.1. Барическая ступень (м/гПа)**

Давление, гПа	Температура, °C				
	- 40	- 20	0	20	40
1000	6,7	7,4	8,0	8,6	9,3
500	13,4	14,7	16,0	17,3	18,6
100	67,2	73,6	80,0	86,4	92,8

## 5 Вертикальный масштаб атмосферы

Барометрические формулы широко используются, в частности, при изучении свойств верхних слоев атмосферы (термосферы и экзосферы) с помощью ИСЗ, космических кораблей и ракет. Отметим, что атмосфера и на больших высотах оказывает существенное влияние на летательные аппараты при их длительном пребывании в ней: под влиянием силы сопротивления происходит постепенное уменьшение полной механической энергии спутника и, как следствие, изменение элементов орбиты. Сила сопротивления и скорость изменения элементов орбиты спутника прямо пропорциональны плотности воздуха на высоте полета. При облете Земли спутник проходит через слои атмосферы с различной плотностью. Для оценки влияния атмосферы на изменение элементов орбиты за полный оборот необходимо знать зависимость плотности воздуха от высоты. Выведем формулы для распределения давления и плотности воздуха по высоте в верхних слоях атмосферы, которые обобщают формулы п. 3. Необходимость такого обобщения диктуется тем, что в верхних слоях атмосферы изменяется с высотой не только температура, но и молекулярная масса (состав воздуха). Ускорение свободного падения при изменении высоты