

Road to IPhO

Физика в горах

Атмосфера реальной планеты, такой как Земля, имеет довольно сложное строение ввиду большого многообразия участвующих в ее формировании процессов и явлений. В этой задаче мы рассмотрим две простые модели нижнего слоя атмосферы, называемого тропосферой, который простирается на высоту до 10–15 км над поверхностью Земли. Для понимания физики некоторых явлений достаточно считать атмосферу Земли состоящей из однокомпонентного двухатомного газа, имеющего молярную массу $\mu_{\text{air}} = 28.9 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.



Часть А. Изотермическая атмосфера (3.2 балла)

В атмосфере самый нижний приповерхностный слой имеет практически постоянную температуру, так как он нагревается от поверхности Земли. Поэтому примем в этой части, что температура атмосферы одинакова по всей ее высоте и равна $T_0 = 293$ К, а давление воздуха у поверхности Земли составляет $p_0 = 1.013 \cdot 10^5$ Па. Считайте, что ускорение свободного падения $g = 9.81$ м/с² не зависит от высоты над поверхностью Земли, так как толщина атмосферы много меньше радиуса Земли $R_E = 6400$ км. Универсальная газовая постоянная равна $R = 8.31$ Дж/(моль · К).

A1 Найдите и вычислите массу M атмосферы Земли.

1.0

A2 Найдите и вычислите давление воздуха p_H на высоте $H = 1500$ м над поверхностью Земли.

1.0

С физической точки зрения интересен вопрос о том, как быстро успевает прогреваться атмосфера при смене дня и ночи. Из наблюдений известна так называемая солнечная постоянная $\alpha = 1367$ Вт/м², которая представляет собой суммарную мощность солнечного излучения в районе орбиты Земли, проходящего через единицу поверхности, ориентированной перпендикулярно его потоку.

A3 Оцените количество теплоты δQ , необходимое для нагревания атмосферы на $\Delta T = 1$ К.

0.6

A4 Найдите и вычислите интервал времени τ , который должно светить Солнце, чтобы сообщить Земле количество теплоты δQ .

0.6

Часть В. Адиабатическая атмосфера (6.8 балла)

Реальная тропосфера не является изотермической и температура воздуха уменьшается с высотой. Благодаря постоянно протекающим конвективным процессам, тропосфера может считаться практически адиабатической. Пусть температура и давление воздуха у поверхности Земли составляют $T_0 = 293$ К и $p_0 = 1.013 \cdot 10^5$ Па соответственно. По-прежнему считайте, что ускорение свободного падения $g = 9.81$ м/с² не зависит от высоты над поверхностью Земли.

B1 Найдите и вычислите температуру воздуха T_H на высоте $H = 1500$ м над поверхностью Земли.

1.2

B2 Найдите и вычислите давление воздуха p_H на высоте $H = 1500$ м над поверхностью Земли.

0.4

В построенной модели высота тропосферы Земли определяется достижением некоторой критической температуры, при которой начинают играть существенную роль другие физические процессы.

B3 Оцените разницу высот ΔH_{atm} тропосферы Земли в дневное и ночное время, если колебание температуры у поверхности за это время составляет $\Delta T_{\text{dn}} = 20$ К.

0.8

Альпинист начинает восхождение на достаточно высокую гору, у подножия которой температура и давление воздуха равны $T_0 = 293$ К и $p_0 = 1.013 \cdot 10^5$ Па. На высоте $H = 1500$ м он решает сделать привал для того, чтобы вскипятить воду и обнаруживает, что она закипает быстрее обычного. Он открывает имеющийся при себе справочник по физике и находит, что при температуре $T_1 = 373$ К давление насыщенного водяного пара равно $p_1 = p_0 = 1.013 \cdot 10^5$ Па, а при температуре $T_2 = 365$ К — $p_2 = 0.757 \cdot 10^5$ Па.

Road to IPhO

B4 Найдите и вычислите температуру кипения воды на высоте $H = 1500$ м. **0.6**

После возобновления подъема альпинист обнаруживает, что на некоторой высоте появляется снег и приходится использовать специальное оборудование.

B5 Найдите и вычислите высоту h_0 , на которой альпинист заметил появление снежного покрова на горе. **0.8**

Альпинист вспомнил разговор с местными жителями перед восхождением, в котором ему сообщили, что снежный покров полностью исчезает с горы при температуре у подножия, превышающей $T = 310$ К.

B6 Найдите и вычислите высоту H_0 горы, на которую совершает восхождение альпинист. **0.4**

Поднявшись еще выше по склону горы на некоторую высоту H' , альпинист замечает появление тумана. Оглянувшись по сторонам, он отмечает, что облаков нет и ветер отсутствует. Альпинист знает, что молярная масса воды составляет $\mu_{\text{H}_2\text{O}} = 18.0 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, а по прогнозу погоды относительная влажность воздуха у подножия горы составляла $\varphi = 0.25$. В справочнике по физике он находит формулу для давления насыщенных паров воды в интервале температур $T \in (250, 300)$ К, которая имеет следующий вид

$$\ln \frac{p_{\text{vap}}}{p_{\text{vap}0}} = a + b \ln \frac{T}{T_0},$$

где p_{vap} — давление насыщенных паров при температуре T , $p_{\text{vap}0}$ — давление насыщенных паров при температуре T_0 , $a = 3.63 \cdot 10^{-2}$, $b = 18.2$ — постоянные. При вычислениях считайте, что пар находится в термодинамическом равновесии с окружающим его воздухом.

B7 Найдите и вычислите высоту H' . **2.0**

B8 Найдите и вычислите минимальную влажность воздуха φ_{min} у подножья горы, при которой на ней еще будет наблюдаться туман. **0.6**

Математическая подсказка

Вам может понадобиться знание следующего интеграла:

$$\int \frac{dx}{ax + b} = \frac{1}{a} \ln |ax + b|.$$