

Сопротивление среды

И. И. Кравченко

Олимпиадная физика Physway

Как известно, при движении тела в среде на тело действует так называемая *сила сопротивления*¹, направленная против скорости тела (считаем среду неподвижной). Сила сопротивления складывается из двух различных сил: силы разности давлений на переднюю и заднюю поверхности тела, силы вязкого трения.

Оценивают влияние каждого из этих слагаемых по *числу Рейнольдса*:

$$\text{Re} = \frac{\rho l v}{\eta},$$

где ρ — плотность среды, l, v — характерный размер и скорость тела, η — вязкость среды.

Упрощенно можно считать, что если $\text{Re} \sim 1$, то сила сопротивления определяется двумя указанными слагаемыми. Если для числа Re это не так, то ситуация упрощается:

- При $\text{Re} \gg 1$ сила сопротивления обусловлена почти исключительно разностью давлений и равна

$$C \frac{\rho v^2}{2} S,$$

где C — коэффициент сопротивления (зависит от Re), S — площадь сечения тела, перпендикулярного вектору скорости. Теоретическое вычисление C трудное, определяют опытно. При оценках $C \sim 1$.

- При $\text{Re} \ll 1$ сопротивление определяется почти только вязким трением:

$$A \eta l v,$$

где A — безразмерный коэффициент (зависит от формы тела и его ориентации относительно скорости). Коэффициент A теоретически вычислить довольно сложно, но для шара показано $A = 6\pi$, если l — радиус шара.

Литература:

- А. Митрофанов. Полёты в струе и наяву. «Квант», 1991, № 9.
- Сивухин. Д. В. Механика. 1979. (Пар. 101. «Применение теории размерности».)
- Задача Ф2623. Задачник «Кванта». «Квант», 2020, № 11–12.

¹Говорят еще — сила лобового сопротивления.

ЗАДАЧА 1. («Квант», Ф2623) В воде глубокого озера на глубине $h = 10$ м на тонкой нитке удерживается воздушный шарик с тонкой нерастяжимой пластиковой оболочкой. Радиус шарика $R = 10$ см. Нитка рвется. Оцените: а) начальное ускорение шарика; б) скорость, которую он приобретет, приближаясь к поверхности воды.

а) $2g$; б) $2,6$ м/с

ЗАДАЧА 2. (Савченко, 2.1.37) Сила сопротивления воздуха, действующая на капли дождя, пропорциональна произведению квадрата скорости капель на квадрат их радиуса: $f = A\rho_0 r^2 v^2$, где $\rho_0 \approx 1,3$ кг/м³ — плотность воздуха, а безразмерный коэффициент A для круглых капель порядка 1. Какие капли, крупные или мелкие, падают на землю с большей скоростью? Оцените скорость капли радиуса $r = 1$ мм при падении ее с большой высоты.

Крупные; $v \approx 5,5$ м/с

ЗАДАЧА 3. («Физтех.Инженер», 2026, отбор, 10) ... Двигается спутник по круговой орбите на высоте $H = 300$ км над Землей. На этой высоте еще чувствуется слабое влияние атмосферы (а точнее, термосферы): давление составляет $p = 0,1$ нПа, температура $T = 1500$ К, молярная масса $M = 16$ г/моль (это, в основном, атомарный кислород). У спутника есть солнечные батареи площадью $S = 10$ м², механизм их ориентации сломался, поэтому они все время развернуты перпендикулярно направлению движения.

Найти работу спутника против сил трения о верхние разреженные слои атмосферы за один виток (в джоулях, с точностью до десятых). Атомы верхних слоев атмосферы взаимодействуют, в основном, с солнечными панелями, причем абсолютно упруго. Радиус Земли $R = 6400$ км. На поверхности Земли $g = 10$ м/с².

6,6 ($\pm 50\%$)