

Силы, действующие во время удара, называют «мгновенными» силами. В процессе удара, длящегося очень малое время  $\tau$ , они резко увеличиваются от нуля до некоторого максимума, а затем снова падают до нуля. Под силами удара можно понимать среднее значение мгновенных сил за малое время удара, так чтобы выражение  $F_{\text{уд}} \tau = m \Delta v$  представляло собой изменение импульса тела за это время (величину  $F_{\text{уд}} \tau$  называют импульсом силы).

Уже давно было известно: чтобы получить «выигрыш» в силе, можно использовать рычаг. Нужно выбрать его точку опоры так, чтобы малая сила  $F_m$  имела большое плечо  $l_6$ , а «выигрышная» большая сила  $F_6$  – малое плечо  $l_m$ . При этом  $F_6 = F_m l_6 / l_m$ . В этом смысле удар является своеобразным рычагом – временным рычагом. Малая сила в течение большого времени  $t_1$  разгоняет шарик, а огромная сила удара  $F_{\text{уд}}$  за малое время  $\tau$  останавливает его, причем  $F_{\text{уд}} = m g t_1 / \tau \approx m g \cdot 10^3$ . Можно образно сказать, что в нашем случае получен «выигрыш» в силе в тысячу раз.

Отметим еще одно важное свойство удара. При соударении очень жестких тел, для которых деформации можно считать бесконечно малыми:  $\delta \rightarrow 0$ , скорости изменяются на конечные величины:  $\Delta v$ ;  $v$ . Оценка времени удара  $\tau \approx \delta / v$  тоже даст бесконечно малую величину:  $\tau \rightarrow 0$ . Из второго закона Ньютона, записанного в виде  $m \Delta v = F_{\text{уд}} \tau$ , видно, что произведение  $F_{\text{уд}} \tau$  является величиной конечной. Значит,  $F_{\text{уд}} \rightarrow \infty$ , т.е. величина ударной силы велика, и по сравнению с ней можно пренебрегать всеми другими конечными силами, действующими во время удара (например, силой тяжести).

Итак, теперь самое время вернуться к эксперименту с бутылкой.

Для того чтобы стекло бутылки лопнуло у ее дна, необходимо по этому дну хорошо ударить. Но чем? Рукой? Нет, потому что рукой произвести удар такой силы невозможно. К тому же, мы ударили рукой по горлышку – казалось бы, должно разбиться горлышко. Остается предположить, что этот удар по дну произвела вода, содержащаяся в бутылке. Но для этого нужно сначала воду «приподнять» от стеклянного дна на некоторую высоту и затем предоставить ей возможность «упасть» на него. Ведь вода несжимаема, и ее соударение с бутылкой напоминает удар тяжелого упругого шарика о стекло. Получается, что нужно ударить по горлышку с такой силой, чтобы уско-

рение бутылки было больше ускорения массы воды – только тогда между водой и дном бутылки сможет образоваться пустой объем, в котором давление будет близко к нулю. Затем после удара по горлышку, который длится малое время, происходит мощное «схлопывание» воды и бутылки под действием атмосферного давления. Соударение между водой и бутылкой, происходит за очень малое время и, как мы уже отмечали, приводит к очень большим разрушающим силам и давлениям.

Проведем необходимые количественные оценки. Прежде всего поставим главный вопрос: какова минимальная величина силы удара по горлышку, достаточная для того, чтобы оторвать воду от дна бутылки? Для этого рассмотрим основные действующие силы.

На воду сверху действует сила атмосферного давления  $F_a^b = p_a S$ , где  $S$  – сечение основной цилиндрической части бутылки. Будем считать, что  $p_a = 10^5$  Па, а  $S = \pi r^2 = 30 \text{ см}^2$  (это соответствует значению радиуса  $r \approx 3,1$  см); тогда  $F_a^b = 300$  Н. Под действием этой силы вся масса воды  $m = 0,5$  кг приобретет ускорение

$$a_b = \frac{F_a^b}{m} = 600 \text{ м/с}^2 = 60g.$$

На бутылку действуют следующие силы: сверху на горлышко действует сила нашего удара  $F$ , а снизу на дно бутылки действует сила атмосферного давления  $F_a^6 = p_a S = 300$  Н. Для того чтобы бутылка приобрела ускорение больше, чем вода (масса бутылки приблизительно равна массе воды), нужно, чтобы выполнялось неравенство

$$F - F_a^6 > F_a^b,$$

т.е. сила нашего удара должна быть больше удвоенной силы атмосферного давления:

$$F > F_a^6 + F_a^b = 2F_a = 600 \text{ Н}.$$

Рассмотрим теперь подробнее первую фазу процесса – удар по горлышку. Допустим, что мы немного превысили величину минимальной необходимой силы и ударили с силой  $F_1 = 650$  Н. Тогда бутылка будет иметь ускорение

$$a_{6_1} = \frac{F_1 - F_a^6}{m} = 700 \text{ м/с}^2 = 70g,$$

а вода получит ускорение

$$a_{b_1} = \frac{F_a^b}{m} = 60g.$$

Будем считать, что время удара порядка сотой доли секунды, т.е.  $\tau_1 = 10^{-2}$  с,

и оценим толщину вакуумного слоя  $\Delta h$ , т.е. расстояние, на которое разойдутся бутылка и вода:

$$\Delta h = \frac{\Delta a \tau_1^2}{2} = \frac{10g \tau_1^2}{2} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 5 \text{ мм}.$$

При этом вода и бутылка приобретут следующие скорости:

$$v_{b_1} = 60g \tau_1 = 6 \text{ м/с},$$

$$v_{6_1} = 70g \tau_1 = 7 \text{ м/с}.$$

После прекращения действия внешней силы (т.е. по истечении времени  $\tau_1$ ) начинается вторая фаза процесса. Теперь на бутылку будет действовать только сила атмосферного давления, направленная вверх, которая сообщит бутылке ускорение

$$a_{6_2} = -\frac{p_a S}{m} = -60g.$$

Это ускорение будет замедлять движение бутылки:

$$v_{6_2} = v_{6_1} - |a_{6_2}| t,$$

вода же будет продолжать движение с ускорением

$$a_{b_2} = a_{b_1} = +60g$$

и скоростью

$$v_{b_2} = v_{b_1} + a_{b_2} t.$$

Столкновение между водой и бутылкой произойдет еще через время  $\tau_2$ , за которое расстояние между ними сократится от  $\Delta h$  до нуля:

$$\tau_2 = \frac{v_{6_1} - v_{b_1}}{2a_b} + \sqrt{\frac{(v_{6_1} - v_{b_1})^2}{(2a_b)^2} + \frac{\Delta h}{a_b}}.$$

Оценку для этого времени получим из соотношения

$$\Delta h = \frac{\Delta a \tau_2^2}{2},$$

где  $\Delta a = a_{b_2} - a_{6_2} = 2a_b = 120g$ :

$$\tau_2 = \sqrt{\frac{2\Delta h}{2a_b}} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ с}.$$

Затем оценим значения скоростей воды и бутылки непосредственно перед их столкновением:

$$v_{b_2} = v_{b_1} + a_{b_2} \tau_2 = 7,8 \text{ м/с},$$

$$v_{6_2} = v_{6_1} - |a_{6_2}| \tau_2 = 5,2 \text{ м/с}.$$

Получается, что вода догоняет бутылку и, ударяя, может разбить ее.

Оценим теперь, какие силы и давления будут возникать непосредственно при соударении – это уже третья фаза процесса. Будем считать удар абсолютно неупругим (разрушение стек-