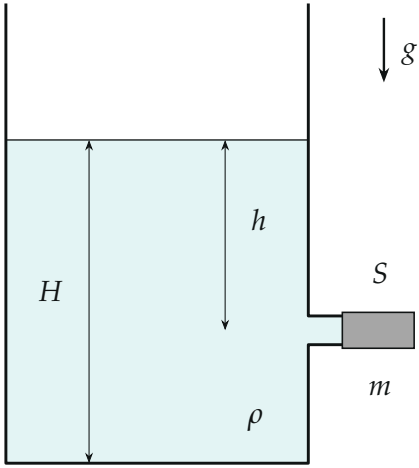
Пробка в стенке бочки

Задача 1. [ВсОШ 2025/26, пригласительный этап, 8 класс, задача 1] «Пробка в стенке бочки».

Бочка заполнена жидкостью до уровня $H = 2{,}5$ м, на глубине $h = 150$ см имеется горизонтальный вывод с площадью поперечного сечения $S = 1$ см^2, закрытый пробкой. Масса пробки $m = 50$ г. Плотность жидкости $\rho = 800$ кг/м^3, $g = 10$ Н/кг, атмосферное давление $P_0 = 10^5$ Па.



1. Определите силу тяжести, действующую на пробку. Ответ выразите в ньютонах, округлите до десятых.
2. Определите силу, с которой атмосфера действует на пробку. Ответ выразите в ньютонах, округлите до целых.
3. Определите силу, с которой жидкость действует на пробку. Ответ выразите в ньютонах, округлите до десятых.
4. Определите силу трения, удерживающую пробку в покое. Ответ выразите в ньютонах, округлите до десятых.
5. Определите давление на дно сосуда после удаления пробки. Ответ выразите в килопаскалях, округлите до целых.

▲ **Решение. Что происходит.** Задача на гидростатическое давление и равновесие тела. Пробку с двух сторон давят: изнутри — жидкость, снаружи — воздух. Давление в жидкости на глубине h больше атмосферного на $\rho g h$ (жидкость сверху тоже открыта воздуху), поэтому изнутри давят сильнее, и пробку удерживает трение о стенки вывода. Когда пробку вынут, жидкость вытекает, пока её уровень не опустится до вывода.

Обозначения. $F_т$ — сила тяжести пробки; $F_а$ — сила давления атмосферы; $F_ж$ — сила давления жидкости; $F_{тр}$ — сила трения; N — сила реакции стенок вывода; P — давление на дно после удаления пробки.

1. Сила тяжести пробки:

$$F_т = mg = 0{,}05\ \text{кг} \cdot 10\ \text{Н/кг} = 0{,}5\ \text{Н}.$$

2. Сила давления атмосферы. Воздух давит на внешний торец пробки площадью S с давлением P_0; по определению давления $F = PS$:

$$F_а = P_0 S = 10^5\ \text{Па} \cdot 10^{-4}\ \text{м}^2 = 10\ \text{Н}.$$

3. Сила давления жидкости. На поверхность жидкости давит атмосфера, а на глубине h к этому добавляется вес столба жидкости над единицей площади, $\rho g h$ (рис. 2). Давление у внутреннего торца пробки $P_0 + \rho g h$, сила

$$F_ж = (P_0 + \rho g h) S = (10^5 + 800 \cdot 10 \cdot 1{,}5)\ \text{Па} \cdot 10^{-4}\ \text{м}^2 = 11{,}2\ \text{Н}.$$

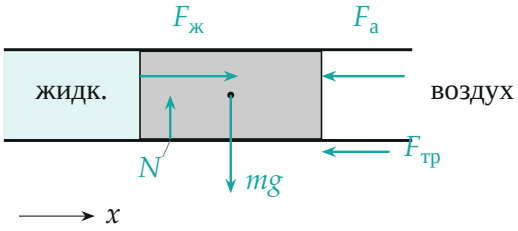


Рис. 1. Силы на пробку: вдоль оси вывода — давление жидкости, давление воздуха и трение; поперёк — тяжесть и реакция стенки

4. Сила трения. Пробка покоится, значит, по первому закону Ньютона сумма сил на неё равна нулю. Направим ось x вдоль вывода наружу (рис. 1) и спроецируем: давление жидкости толкает пробку наружу ($+F_ж$), воздух и трение — внутрь:

$$F_ж - F_а - F_{тр} = 0 \quad \Rightarrow \quad F_{тр} = F_ж - F_а = \rho g h S = 11{,}2 - 10 = 1{,}2 \text{ Н}.$$

Трение направлено внутрь бочки: без него пробку вытолкнуло бы наружу. Атмосферное давление сократилось — пробку держит только «лишнее» давление столба жидкости $\rho g h$. Поперёк оси тяжесть mg уравновешена реакцией стенки N и на трение вдоль оси не влияет.

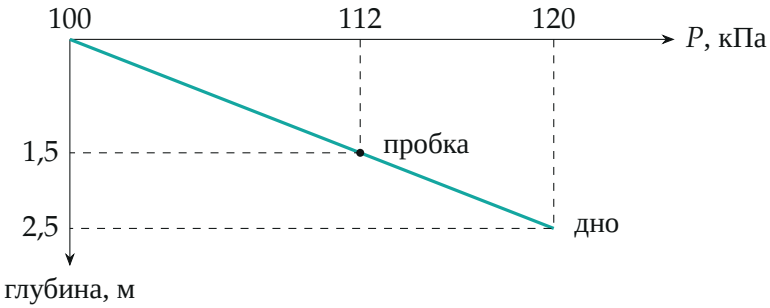


Рис. 2. Давление в жидкости растёт с глубиной линейно: P_0 у поверхности, 112 кПа у пробки (ось глубины направлена вниз)

5. Давление на дно после удаления пробки. Пока уровень жидкости выше вывода, давление у отверстия больше атмосферного, и жидкость вытекает. Вытекание прекратится, когда давление у отверстия станет равно P_0, то есть уровень опустится до вывода (рис. 3). Вывод находится на высоте $H - h = 2{,}5 - 1{,}5 = 1{,}0$ м над дном — столько жидкости и останется. Давление на дно — атмосферное плюс давление оставшегося столба:

$$P = P_0 + \rho g (H - h) = 10^5 + 800 \cdot 10 \cdot 1{,}0 = 108\,000 \text{ Па} = 108 \text{ кПа}.$$

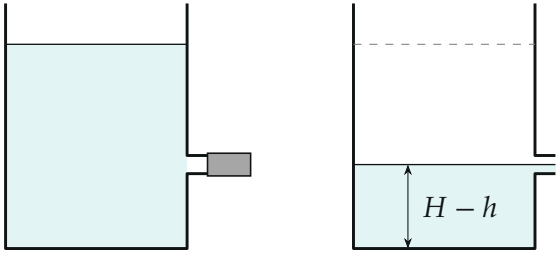


Рис. 3. Вынули пробку — жидкость вытекает, пока уровень не опустится до вывода; остаётся столб $H - h = 1$ м

Обратите внимание. Давление на дно включает и атмосферное: воздух давит на открытую поверхность жидкости, и жидкость передаёт это давление дну. Одно только давление столба — 8 кПа.

Проверка. Размерности: $\rho g h S$ — $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot \frac{\text{Н}}{\text{кг}} \cdot \text{м} \cdot \text{м}^2 = \text{Н}$. Предел: при $h \to 0$ (пробка у поверхности) давления с двух сторон равны, и трение не нужно, $F_{\text{тр}} \to 0$. Второй способ для п. 4: $F_{\text{тр}} = \rho g h S = 800 \cdot 10 \cdot 1{,}5 \cdot 10^{-4} = 1{,}2$ Н — то же.

Смысл: атмосфера давит со всех сторон и в равновесии пробки сокращается, а на дно действует целиком.

Ответ. 1) $mg = 0{,}5$ Н; 2) $P_0 S = 10$ Н; 3) $(P_0 + \rho g h) S = 11{,}2$ Н; 4) $F_{\text{тр}} = \rho g h S = 1{,}2$ Н; 5) $P = P_0 + \rho g (H - h) = 108$ кПа.