

## Две трубы, два поршня, две части...

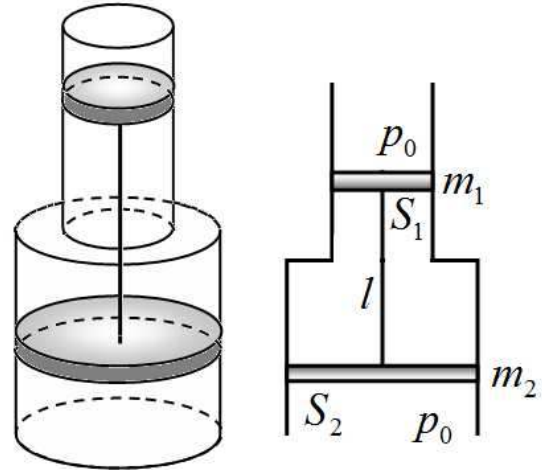
### Условие

#### Задача 2. Две трубы, два поршня, две части...

Два цилиндра поперечными сечениями  $S_1 = 20 \text{ см}^2$  и  $S_2 = 80 \text{ см}^2$  сварены так, что их оси совпадают. В цилиндры вставлены легкоподвижные поршни массами  $m_1 = 200 \text{ г}$  и  $m_2 = 800 \text{ г}$  соответственно, связанные жестким невесомым стержнем длиной  $l = 20 \text{ см}$ .

#### Часть 1. Воздух.

Между поршнями герметически заперт воздух, количество которого остается постоянным. При нормальном атмосферном давлении  $p_0 = 101 \text{ кПа}$  поршни находятся в равновесии на одинаковом расстоянии от места стыка труб. Температура окружающего воздуха и воздуха внутри труб не изменяется.



1.1. Определите давление  $p$  воздуха между поршнями, при котором поршни находятся в равновесии.

1.2. Сжат или растянут стержень? Чему равна сила упругости, действующая в стержне?

1.3. Рассмотрим поршни, стержень и воздух между ними как единую систему. Укажите все внешние силы, действующие на нее. Покажите, что эта система находится в равновесии при найденном вами в п. 1.1 давлении воздуха между поршнями.

Рассматриваемое устройство может служить барометром – прибором для измерения атмосферного давления.

1.4 Определите изменение атмосферного давления  $\Delta p_0$ , если поршни опустились на  $\Delta h = 1,0 \text{ см}$ .

Будем считать, что устройство разрушается, если верхний поршень опускается ниже уровня стыка труб. Считаем, что атмосферное давление опять стало равным  $p_0 = 101 \text{ кПа}$ .

1.5 Найдите максимальную массу груза, который можно положить на верхний поршень, чтобы при этом система не разрушилась.

1.6 Найдите максимальную массу груза, который можно подвесить к нижнему поршню, чтобы при этом система не разрушилась.

#### Часть 2. Вода.

(численных расчетов в данной части проводить не надо!)

Пространство между поршнями полностью заполнили водой, плотность которой равна  $\rho$ . При этом верхний поршень оказался на некотором расстоянии  $l_1$  от места стыка труб.

2.1. Определите модуль силы упругости  $T$  в стержне при отсутствии дополнительного груза. Сжат или растянут стержень в этом случае?

2.2. Как изменится сила упругости в стержне, если груз массой  $m$ ,

первоначально находившийся на верхнем поршне, подвесить к нижне-

му поршню? 2.3. Рассмотрим поршни, стержень и воду между ними как

единую систему. Укажите все внешние силы, действующие на нее. По-

кажите, что эта система находится в равновесии при найденных вами

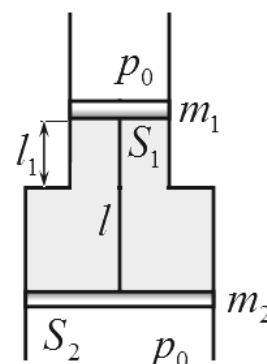
в п. 2.1 условиях. 2.4 Может ли система находиться в состоянии равновесия при отсутствии

атмосферного давления? 2.5 Какой максимальный груз (имеется ввиду его масса  $M$ ) мож-

но положить на верхний поршень, чтобы система оставалась в равновесии при нормальном

атмосферном давлении? Считайте, что сами поршни, трубы и стержень не разрушаются.

Температуру воды считайте близкой к комнатной.



## Решение

**Задача 10.2.** Две трубы, два поршня, две части...

2.1. 2.2 На рисунке изображены силы, действующие на поршни.

Предполагаем, что стержень сжат, если это не так, то в резуль-

тате решения получим отрицательное значение для силы упру-

гости. Так как расстояние между поршнями мало, то считаем,

что давление воздуха между поршнями постоянно по высоте.

Так же можно пренебречь массой воздуха между поршнями.

Условия равновесия поршней имеют вид:

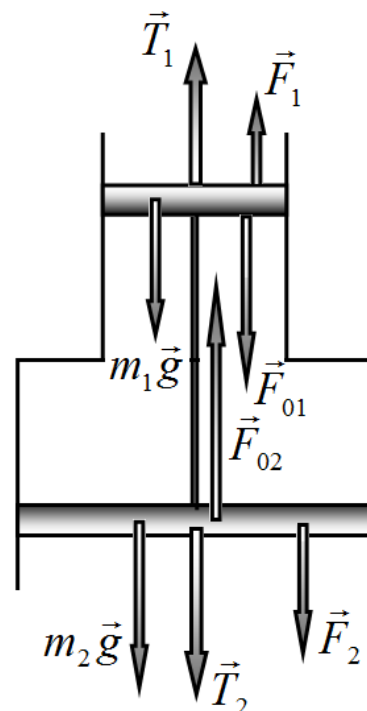
$$\vec{F}_1 + \vec{F}_{01} + \vec{T}_1 + m_1 \vec{g} = 0, \quad (1)$$

$$\vec{F}_2 + \vec{F}_{02} + \vec{T}_2 + m_2 \vec{g} = 0. \quad (2)$$

Здесь  $\vec{F}_1, \vec{F}_2$  – силы давления воздуха внутри цилиндров на верхний и нижний поршни поршень (их модули равны  $F_1 = pS_1, F_2 = pS_2$ );  $\vec{F}_{01}, \vec{F}_{02}$  – силы атмосферного давления, действующие на поршни (их модули -  $F_{01} = p_0 S_1, F_{02} = p_0 S_2$ );

$m_1 \vec{g}$  и  $m_2 \vec{g}$  – силы тяжести, действующие поршни;  $\vec{T}_1$  и  $\vec{T}_2$  – силы взаимодействия со стержнем верхнего и нижнего поршней соответственно, (поскольку стержень невесомый то модули этих сил одинаковы  $T_1 = T_2 = T$ ).

В проекциях на вертикальную ось эти уравнения имеют вид:



$$pS_1 - p_0S_1 + T - m_1g = 0, \quad (3)$$

$$-pS_2 + p_0S_2 - T - m_2g = 0. \quad (4)$$

Решая систему уравнений (3) и (4), получим:

$$p = p_0 - \frac{m_1 + m_2}{S_2 - S_1}g; \quad (5)$$

$$T = \frac{m_1S_2 + m_2S_1}{S_2 - S_1}g \quad (6)$$

Из соотношения (6) следует, что при любых значениях параметров найденная сила упругости положительна, значит исходное предположение о том, что стержень сжат - верно.

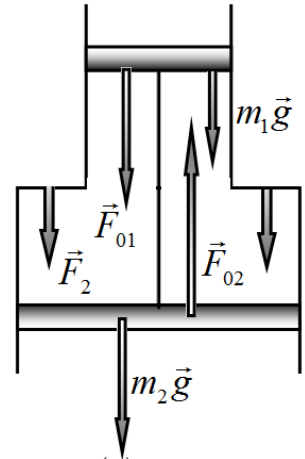
После подстановки численных значений получаем  $p = 99$  кПа ,  $T = 5,3$ Н.

**1.3** Очевидными внешними силами, действующими на выделенную систему, являются силы тяжести и силы атмосферного давления. Однако сумма сил атмосферного давления  $p_0(S_2 - S_1)$ , как следует из формулы (5)

$$p_0(S_2 - S_1) = (m_1 + m_2)g + p(S_2 - S_1). \quad (7)$$

превышает, силу тяжести поршней!

Причина несоответствия в том, что на газ со стороны стенок действует сила, равная по третьему закону Ньютона силе давления газа. Конечно, сумма этих сил, действующих со стороны боковых стенок равна нулю. Но есть еще сила  $\vec{F}_2$ , действующая со стороны торца стыка, модуль которой равен  $F_2 = p(S_2 - S_1)$ . Именно эта сила входит в равенство (7) , которое и является условием равновесия выделенной системы.



Вспомните объяснение гидростатического парадокса – сила давления на дно сосуда может быть больше веса налитой в него жидкости.

*Заметим, что при правильном понимании физической ситуации уравнение (7) могло быть записано сразу и положено в основу решения данной части задачи.*

**1.4** Обозначим  $(p_1, V_1)$ ,  $(p_2, V_2)$  - давление и объем воздуха между поршнями до и после изменения атмосферного давления, соответственно.

Так как температура не изменилась, то для воздуха внутри труб выполняется закон Бойля-Мариотта

$$p_1V_1 = p_2V_2. \quad (7)$$

Из уравнения (5) следует, что изменение атмосферного давления на величину  $\Delta p$  приводит к такому же изменению давления между поршнями, поэтому уравнение (7) можно записать в виде

$$p_1 V_1 = (p_2 + \Delta p)(V_1 + \Delta V) \quad (8)$$

Где  $V_1 = \frac{l}{2}(S_2 + S_1)$  - объем воздуха до опускания поршней,  $\Delta V = \Delta h(S_2 - S_1)$  - его изменение при опускании. Из этого уравнения следует, что изменение давления равно

$$\Delta p = p_1 \frac{V_1}{V_1 + \Delta V} - p_1 = -p_1 \frac{\Delta V}{V_1 + \Delta V} = -\frac{p_1}{\frac{l(S_2 + S_1)}{2\Delta h(S_2 - S_1)} + 1}, \quad (9)$$

где  $p_1$  - подсчитанное ранее давление (5). Подстановка численных значений приводит к результату  $\Delta p_0 = 5,6$  кПа.

Можно еще более упростить решение, если заметить, что относительное изменение объема мало, поэтому мало и относительное изменение атмосферного давления. Тогда из уравнения  $PV = const$  следует  $P\Delta V + \Delta P \cdot V = 0$ . Отсюда находим  $\Delta P = -P\frac{\Delta V}{V}$ , что совпадает с формулой (9), если в ней пренебречь малой величиной  $\Delta V$  в знаменателе.

1.5 – 1.6 Так как массы поршней симметрично входят в формулу (5) для давления воздуха между ними, поэтому последние два пункта задачи имеют одинаковые решения. Если верхний поршень опустится до стыка труб, то давление воздуха между поршнями станет равным (из закона Бойля-Мариотта)

$$p_2 = p_1 \frac{V}{V_1} = p_1 \frac{\frac{l}{2}(S_1 + S_2)}{S_2 l} = \frac{p_1}{2} \left( \frac{S_1}{S_2} + 1 \right). \quad (10)$$

Изменение давление соответственно равно

$$p_2 - p_1 = \frac{p_1}{2} \left( \frac{S_1}{S_2} + 1 \right) - p_1 = -\frac{p_1}{2} \left( 1 - \frac{S_1}{S_2} \right). \quad (11)$$

Из уравнения (5) следует, что изменение давления связано с изменением массы поршней соотношением

$$\Delta p = -\frac{\Delta m}{S_2 - S_1} g. \quad (12)$$

Приравнивая эти выражения, получим

$$\frac{\Delta m}{S_2 - S_1} g = \frac{p_1}{2} \left( 1 - \frac{S_1}{S_2} \right) \Rightarrow \Delta m = \frac{p_1(S_2 - S_1)}{2g} \left( 1 - \frac{S_1}{S_2} \right) \approx 4,5 \text{ кг}. \quad (13)$$

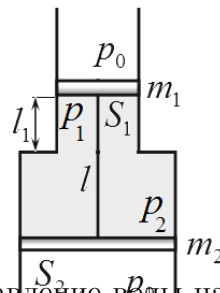
## Часть 2. Вода.

Ход решения данной части задачи аналогичен решению предыдущей части, с воздухом между поршнями (только результаты получаться противоположными!). Главное отличие заключается в том, что объем воды остается постоянным, поэтому поршни сдвигаться не могут. Кроме того, необходимо учесть изменение давления с высотой (гидростатическое давление).

2.1 Уравнения равновесия поршней аналогичны уравнениям (3)-(4), поэтому перепишем их без особых комментариев

$$p_1 S_1 - p_0 S_1 + T - m_1 g = 0 \quad (14)$$

$$-p_2 S_2 + p_0 S_2 - T - m_2 g = 0 \quad (15)$$



Здесь обозначено:  $p_1$  - давление воды на верхний поршень,  $p_2 = p_1 + \rho g l$  - давление воды на нижний поршень.

Решение этой системы уравнений имеет вид

$$p_1 = p_0 - \frac{(m_1 + m_2) g + \rho g l S_2}{S_2 - S_1} \quad (16)$$

$$T = \frac{m_1 S_2 + m_2 S_1 + \rho l S_1 S_2}{S_2 - S_1} g \quad (17)$$

Из формулы (17) следует, что и в данном случае стержень всегда растянут!

2.2 Когда груз находится на верхнем поршне сила его натяжения равна

$$T_1 = \frac{(m_1 + M) S_2 + m_2 S_1 + \rho l S_1 S_2}{S_2 - S_1} g \quad (18)$$

А если его подвесить к нижнему поршню, то она станет равной

$$T_2 = \frac{m_1 S_2 + (m_2 + M) S_1 + \rho l S_1 S_2}{S_2 - S_1} g \quad (19)$$

Следовательно, изменение этой силы равно

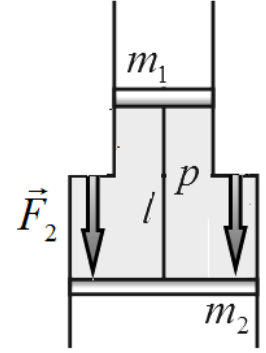
$$T_2 - T_1 = -Mg \quad (20)$$

т.е. уменьшается на силу тяжести груза.

2.3 Помимо сил тяжести и сил атмосферного давления, на воду и поршни действует сила со стороны выступа торца -  $F_2$ .

$$F_2 = p' (S_2 - S_1) \quad (22)$$

где  $p' = p_1 + \rho g l_1 = p_0 - \frac{(m_1 + m_2)g + \rho g l S_2}{S_2 - S_1} + \rho g l_1$  - давление на уровне стыка труб. Тем самым получаем, что рассматриваемая сила равна



$$\begin{aligned} F_2 = p' (S_2 - S_1) &= \left( p_0 - \frac{(m_1 + m_2)g + \rho g l S_2}{S_2 - S_1} + \rho g l_1 \right) (S_2 - S_1) = \\ &= p_0 (S_2 - S_1) - (m_1 + m_2)g - \rho g l S_2 + \rho g l_1 (S_2 - S_1) = \\ &= p_0 (S_2 - S_1) - (m_1 + m_2)g - \rho g (S_1 l_1 + S_2 (l - l_1)) \end{aligned} \quad (23)$$

Последнее слагаемое в этой формуле есть ни то иное, как сила тяжести, действующая на воду. Тем самым мы показали, что система находится в равновесии:

$$p_0 (S_2 - S_1) = M_{\text{общ.}} g + F_2 \quad (24)$$

где  $M_{\text{общ.}}$  - общая масса воды и поршней.

2.4 Формально, условие равновесия (24) может выполняться и при отсутствии атмосферного давления, правда при этом и сила  $F_2$  и давление внутри жидкости станут

отрицательными – жидкость повиснет на торце! Однако, при уменьшении атмосферного давления будет уменьшаться и давление внутри жидкости. Когда последнее опустится до давления насыщенного пара, жидкость закипит, то есть разорвется. Поэтому в реальности равновесия при отсутствии внешнего давления быть не может.

2.5 Итак условием разрыва жидкости является понижение ее давления до давления насыщенного пара. Минимальное давление жидкости в рассматриваемой системе - у верхнего поршня, поэтому условие разрыва имеет вид

$$p_1 = p_0 - \frac{(m_1 + m_2 + M)g + \rho g l S_2}{S_2 - S_1} = p_{\text{нас.}}$$

При комнатной температуре давление насыщенного пара значительно меньше нормального атмосферного давления  $p_{\text{нас.}} \ll p_0$ , поэтому приближенно (но с высокой степенью точности) уравнение (25) приводит к уравнению

$$p_0 - \frac{(m_1 + m_2 + M)g + \rho g l S_2}{S_2 - S_1} = 0.$$

Из которого следует, что максимальная масса груза равна

$$M_{\text{max}} = \frac{p_0 (S_2 - S_1)}{g} - \rho l S_2 - m_1 - m_2.$$