

Решения и критерии оценивания решений
Задач заключительного тура олимпиады «Росатом», 2020-2021 учебный год,
физика, 10 класс

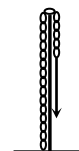
Задания

1. На шероховатом горизонтальном столе находятся два тела массами m и $2m$ ($m=1$ кг), связанные невесомой ниткой. Нитка разрывается, если к телу массой m прикладывают минимальную силу $F_1 = 200$ Н. Какую минимальную силу следует приложить к другому телу чтобы нить разорвалась? Коэффициенты трения между телами и поверхностью одинаковы и равны $\mu = 0,3$.

2. Феррари, Мерседес и Жигули движутся с постоянными скоростями по прямой дороге. Когда Мерседес и Жигули находились в одной точке, Феррари был на расстоянии S позади. Когда Феррари догнал Жигули, Мерседес был впереди них на расстоянии $2S/3$. На каком расстоянии позади Феррари и Мерседеса окажутся Жигули в тот момент, когда Феррари догонит Мерседес?

3. Тепловой насос, работающий по обратному циклу Карно, передает тепло от холодильника с водой при температуре $t_1 = 0^\circ$ С нагревателю с водой при температуре $t_2 = 100^\circ$ С. Сколько воды нужно заморозить в холодильнике, чтобы превратить в пар $m=1$ кг воды в нагревателе? Удельная теплота плавления льда - $\lambda = 3,4 \cdot 10^5$ Дж/кг, удельная теплота парообразования воды - $r = 2,3 \cdot 10^6$ Дж/кг.

4. Около тонкой гладкой вертикальной стенки лежит цепочка с очень мелкими звеньями длиной l и массой m . Высота стенки меньше длины цепочки и равна $5l/6$. Какую минимальную работу нужно совершить, чтобы втащить цепочку на стенку так, как показано на рисунке?



5. Тонкая металлическая пластинка площади S залита в очень широком сосуде слоем жидкого диэлектрика с диэлектрической проницаемостью ϵ и плотностью ρ так, что толщина слоя диэлектрика много меньше линейных размеров пластинки. Пластинка заряжена положительным зарядом Q . Поднимется или опустится уровень жидкости над пластиной, и если да, то на сколько?



Решения

Поскольку $F_1 > 3\mu mg$, разрыв нити произойдет в процессе движения тел. Поэтому второй закон Ньютона для тел при приложении силы F к телу массой m , дает

$$ma = F - T - \mu mg$$

$$2ma = T - 2\mu mg$$

где a - ускорение тел, T - сила натяжения нити. Отсюда находим

$$T = \frac{2F}{3}$$

Поскольку нить рвется, когда сила, действующая на тело массой m , равна F_1 , то максимальная сила натяжения, которую выдерживает нить T_0 , равна

$$T_0 = \frac{2F_1}{3}$$

Если сила приложена ко второму телу, то

$$\begin{aligned} ma &= T - \mu mg \\ 2ma &= F - T - 2\mu mg \end{aligned}$$

Отсюда

$$T = \frac{F}{3}$$

Нить порвется, если эта сила равна T_0 . Поэтому значение силы, действующей на тело массой $2m$, при которой порвется нить, равно

$$F = 2F_1$$

Эта сила не зависит от трения.

Критерии оценки задачи (максимальная оценка за задачу – 2 балла)

- 1. Идея решения – сила натяжения должна превысить предел прочности нити, найти его из одного условия, а затем использовать в другом – 0,5 балла**
- 2. Правильно составлены уравнения второго закона Ньютона – 0,5 балла**
- 3. Правильно найден предел прочности нити – 0,5 балла**
- 4. Правильный ответ – 0,5 балла**

2. Из условия понятно, что для скоростей выполнены неравенства $v_{\text{ж}} < v_{\text{м}} < v_{\text{ф}}$. В системе отсчета, связанной с Жигулями, Феррари и Мерседес едут в ту же сторону со скоростями $v_{\text{ф}} - v_{\text{ж}}$ и $v_{\text{м}} - v_{\text{ж}}$ соответственно, причем $v_{\text{м}} - v_{\text{ж}} < v_{\text{ф}} - v_{\text{ж}}$. В этой системе отсчета имеем для момента, когда Феррари догонит Жигули

$$\frac{S}{v_{\text{ф}} - v_{\text{ж}}} = \frac{d}{v_{\text{м}} - v_{\text{ж}}}$$

(где $d = 2S/3$). Отсюда

$$\frac{S}{d} = \frac{v_{\text{ф}} - v_{\text{ж}}}{v_{\text{м}} - v_{\text{ж}}}$$

Теперь можно найти расстояние от Жигулей до точки, в которой Феррари догонит Мерседес на расстоянии

$$x = \frac{S(v_{\text{м}} - v_{\text{ж}})}{(v_{\text{ф}} - v_{\text{ж}}) - (v_{\text{м}} - v_{\text{ж}})} = \frac{S}{\frac{v_{\text{ф}} - v_{\text{ж}}}{v_{\text{м}} - v_{\text{ж}}} - 1}$$

(и которое от системы отсчета не зависит). Подставляя в эту формулу отношение скоростей Феррари и Мерседеса, находим расстояние от Жигулей до Феррари и Мерседеса

$$x = \frac{Sd}{S - d}$$

Подставляя в эту формулу $d = 2S/3$, получаем окончательно

$$x = 2S$$

Критерии оценки задачи (максимальная оценка за задачу – 2 балла)

1. Правильное использование формул расстояние-время-скорость – 0,5 балла
2. Правильное уравнение (через скорости машин) для расстояния, на котором Мерседес окажется впереди Феррари и Жигулей, когда последние встретятся – 0,5 балла
3. Правильное уравнение (через скорости машин) для расстояния, на котором Жигули окажутся позади Феррари и Жигулей, когда последние встретятся – 0,5 балла
4. Правильный ответ – 0,5 балла

3. Тепловой насос, работающий по любому обратному циклу, забирает некоторое количество теплоты у холодного тела (холодильника) и передает его горячему телу, совершая некоторую работу A (которая тоже передается нагревателю)

$$Q_n = A + Q_x$$

При этом переданное нагревателю количество теплоты и работа связаны определением КПД прямого цикла

$$\eta = \frac{A}{Q_n}$$

Отсюда находим связь количества теплоты, взятого насосом у холодильника и переданного нагревателю

$$Q_n = \frac{Q_x}{1 - \eta}$$

Используя далее формулу для КПД цикла Карно, получим

$$Q_n = \frac{T_n Q_x}{T_x}$$

где T_n и T_x - абсолютные температуры нагревателя и холодильника данного цикла Карно. Для испарения в нагревателе $m = 1$ кг воды необходимо количество теплоты $Q_n = rm$, где r - удельная теплота парообразования. Для этого холодильник должен отдать количество теплоты

$$Q_x = \frac{T_x rm}{T_n}$$

А для этого должно замерзнуть

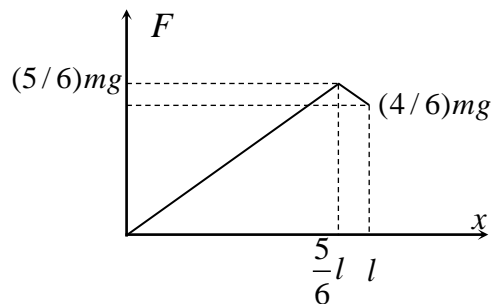
$$m_1 = \frac{Q_x}{\lambda} = \frac{T_x rm}{T_n \lambda} = 4,95 \text{ кг}$$

воды в холодильнике.

Критерии оценки задачи (максимальная оценка за задачу – 2 балла)

1. Правильная идея решения – понимание, какие процессы происходят в тепловом насосе, что тепло передается нагревателю, температуры которых при этом не меняются – 0,5 балла
2. Правильная формула для КПД цикла Карно, количества теплоты, переданного нагревателю – 0,5 балла
3. Правильные уравнения теплового баланса для испарения воды и таяния льда – 0,5 балла
4. Правильный ответ (в том числе и число) – 0,5 балла

4. Поскольку цепочку поднимают медленно, то сила, которой необходимо действовать на ее конец должна компенсировать силу тяжести, действующую на поднятые звенья. Поэтому эта сила меняется в процессе движения и для вычисления работы будем использовать графический метод.



Построим график зависимости внешней силы F от величины перемещения конца цепочки x . График начинается из нуля (когда цепочка целиком лежит на полу, ее можно начать поднимать, фактически, нулевой силой). Когда перемещение конца равно высоте стенки, масса поднятой части цепочки равна $5m/6$, сила равна $5mg/6$. При дальнейшем перемещении конца цепочки за стенку сила будет уменьшаться, поскольку перетянутый за стенку кусочек цепочки будет компенсировать определенную долю силы тяжести, действующей на другую часть цепочки. Очевидно, в конечный момент при перемещении конца цепочки l внешняя сила равна $4mg/6$ (см. рисунок). Вычисляя площадь под графиком, получим

$$A = \frac{17}{36} mgl$$

Критерии оценки задачи (максимальная оценка за задачу – 2 балла)

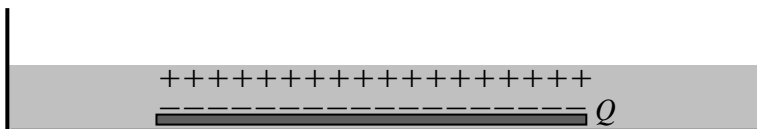
1. Правильная идея решения – искать работу через график зависимости силы от перемещения конца цепочки – 0,5 балла
2. Правильный график – 0,5 балла
3. Правильно вычислены площади – 0,5 балла
4. Правильный ответ – 0,5 балла

5. Поскольку жидкость – диэлектрик с диэлектрической проницаемостью ε , то в пренебрежении краевыми эффектами напряженность электрического поля в жидкости уменьшится в ε раз по сравнению с полем в вакууме, и поле в диэлектрике будет равно

$$E = \frac{Q}{2S\varepsilon\varepsilon_0} \quad (1)$$

С другой стороны, уменьшение поля связано с поляризацией диэлектрика, т.е. на поверхности диэлектрика будут индуцированы заряды, которые создают свое собственное поле, которое, сложившись с полем пластины, и дадут уменьшение поля в диэлектрике. Эти заряды (сумма которых равна нулю, поскольку диэлектрик не заряжен) будут индуцированы на поверхности диэлектрика, касающейся пластины, и на внешней поверхности диэлектрика (см. рисунок). Пусть эти заряды равны q и $-q$ (величину q считаем положительной). Тогда поле, созданное этими зарядами внутри диэлектрика

$$E_1 = \frac{q}{S\varepsilon_0}$$



вместе с полем зарядов пластины

$$E_0 = \frac{Q}{2S\varepsilon_0}$$

должно дать поле (1). Т.е.

$$\frac{Q}{2S\varepsilon\varepsilon_0} = E_0 - E_1 = \frac{Q}{2S\varepsilon_0} - \frac{q}{S\varepsilon_0}$$

Отсюда находим заряды, индуцированные в диэлектрике

$$q = \frac{(\varepsilon - 1)Q}{2\varepsilon}$$

В результате, на заряды поверхности диэлектрика будет действовать сила притяжения к заряду $-q$ и отталкивания от заряда Q , которое больше. Это значит, что на внешнюю поверхность диэлектрика будет действовать сила

$$F = \frac{q(Q - q)}{2S\varepsilon_0} = \frac{qQ}{2S\varepsilon\varepsilon_0} = \frac{(\varepsilon^2 - 1)Q^2}{8S\varepsilon^2\varepsilon_0}, \quad (2)$$

направленная вертикально вверх, и поверхность диэлектрика поднимется. Величину подъема Δh можно найти из условия, что сила (2) создает избыточное гидростатическое давление

$$\rho g \Delta h = \frac{F}{S} \quad \Rightarrow \quad \Delta h = \frac{(\varepsilon^2 - 1)Q^2}{8S\varepsilon^2\varepsilon_0 S \rho g}$$

Критерии оценки задачи (максимальная оценка за задачу – 2 балла)

- 1. Правильная идея решения – нахождение зарядов внешней и внутренней (около пластины) поверхностей диэлектрика и учет взаимодействия внешнего заряда с остальными зарядами – 0,5 балла**
- 2. Правильные заряды внешней и внутренней поверхностей диэлектрика – 0,5 балла**
- 3. Правильная формула для силы, действующей на внешнюю поверхность диэлектрика – 0,5 балла**
- 4. Правильный ответ – 0,5 балла**

Оценка работы

Оценка работы складывается из оценки задач. Максимальная оценка – 10 баллов. Допустимыми являются все целые или «полуцелые» оценки от 0 до 10.