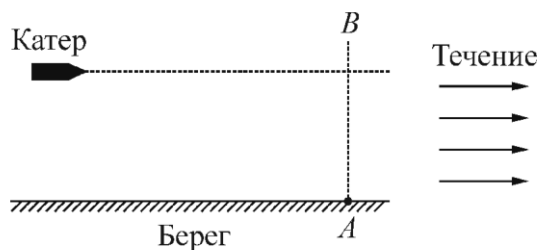


МОШ, 2014/15, заключительный этап, 11 класс

Условия, ответы и решения

1 Волны катера на течении

Вдоль направления течения прямой реки по спокойной воде плывёт маленький катер, траектория которого параллельна берегу и лежит на расстоянии L от него. Скорость течения реки равна V . Стоящий на берегу в точке A наблюдатель увидел, что первая волна от катера достигла точки A спустя время t после того, как катер пересёк прямую AB , перпендикулярную берегу (см. рис.). После этого волны ударяли о берег в этом месте с периодом T . Расстояние между соседними гребнями волн равно λ . Найдите скорость катера относительно воды, считая, что волны, возбуждаемые катером на поверхности воды, близки к гармоническим.



Подсказка

В системе отсчёта катера волны заполняют только угол («конус Маха»). Свяжите угол полураствора с отношением скорости волн к скорости катера, а период на берегу — с проекцией скорости волн вдоль берега.

Ответ

$$v = \frac{\lambda}{\sqrt{T^2 - (\lambda t/L)^2}} - V.$$

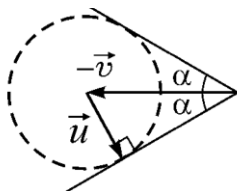
Решение

Пусть v — скорость катера относительно стоячей воды, u — скорость распространения волн относительно поверхности стоячей воды. Запишем формулу для скорости волн, учитывая, что они близки к гармоническим:

$$u = \lambda/T_0,$$

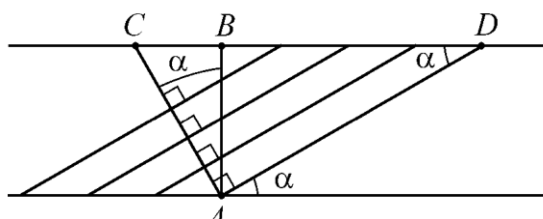
где T_0 — период волн в системе отсчёта, связанной с водой.

Перейдём в систему отсчёта, связанную с катером.



В этой системе отсчёта вода движется относительно катера со скоростью $-\vec{v}$, а волны распространяются относительно воды из каждой точки, в которой находился катер, во всех направлениях со скоростью, по модулю равной u (иначе говоря, гребни волн, испущенных в некоторый момент, в следующие моменты времени находятся на одинаковом расстоянии от точки испускания, которая движется со скоростью v). Из закона сложения скоростей следует, что относительно катера волны распространяются только внутри угла 2α , изображённого на рисунке (это так называемый «конус Маха»; в трёхмерном случае волны распространяются внутри конуса). Относительно берега реки «конус Маха» как единое целое движется со скоростью $v + V$, и поэтому гребни волн образуют с берегом тот же угол α , что изображён на рисунке. Из условия задачи следует, что $u < v$ (иначе волны обгоняли бы катер, и первая волна пришла бы в точку A до того, как катер пересёк линию AB).

Рассмотрим рисунок, на котором показан гребень волны AD и набор параллельных ему гребней следующих волн.

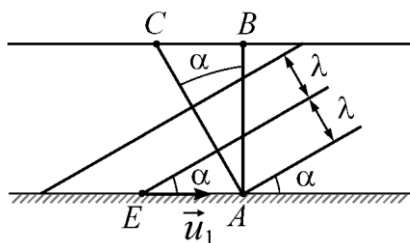


В точку A дошла волна, испущенная из точки C , а катер за это время прошёл отрезок CD . Из рисунков следуют уравнения:

$$\sin \alpha = \frac{u}{v}, \quad (1)$$

$$L = BD \cdot \operatorname{tg} \alpha = (v + V) t \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (2)$$

Свяжем величины T_0 и T (то есть фактически учтём эффект Доплера). Если волны распространяются в стоячей воде, то скорость движения вдоль берега точки E (это точка пересечения линии гребня волны с берегом) равна $u_1 = \frac{u}{\sin \alpha}$. Отрезок $AE = \frac{\lambda}{\sin \alpha}$. Поэтому $\frac{u}{\sin \alpha} = \frac{\lambda}{T_0 \sin \alpha}$. Если же волны распространяются в воде, которая течёт со скоростью V , то эту скорость течения нужно добавить к скорости u_1 , и учесть, что изменится период волн. При этом получится соотношение $\frac{u}{\sin \alpha} + V = \frac{\lambda}{T \sin \alpha}$, где T — заданный в условии задачи период волн, наблюдаемых в системе отсчёта, связанной с берегом.



Отсюда

$$u = \frac{\lambda}{T} - V \sin \alpha. \quad (3)$$

Из уравнений (1) и (3) получаем:

$$v + V = \frac{\lambda}{T \sin \alpha}. \quad (4)$$

Из уравнений (2) и (4):

$$v + V = \frac{L}{t \cdot \operatorname{tg} \alpha} = \frac{\lambda}{T \sin \alpha}.$$

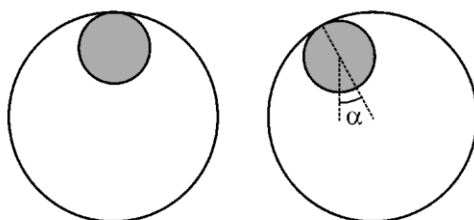
Отсюда $\cos \alpha = \frac{\lambda t}{LT}$, $\sin \alpha = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda t}{LT}\right)^2}$. С учётом этого из (4) окончательно находим:

$$v = \frac{\lambda}{\sqrt{T^2 - \left(\frac{\lambda t}{L}\right)^2}} - V.$$

Отметим, что, поскольку $u < v$, то $V < \frac{\lambda}{\sqrt{T^2 - (\lambda t/L)^2}}$, то есть $v > 0$.

2 Обруч на неподвижном бревне

Цилиндрическое бревно радиусом r , ось которого горизонтальна, неподвижно закреплено. На бревно надет тонкий однородный обруч массой m и радиусом R так, как показано на рисунке слева. Обруч вывели из положения равновесия, отклонив его в плоскости рисунка так, что прямая, соединяющая центр обруча и точку касания обруча с бревном, образовала угол α с вертикалью (см. рис. справа), и отпустили. В процессе возникших после этого колебаний обруч движется по бревну без проскальзывания.



1. Найдите скорость нижней точки обруча при прохождении им положения равновесия.
2. Найдите модуль силы, с которой обруч давит на бревно при прохождении положения равновесия.

Подсказка

Где находится мгновенная ось вращения обруча, катящегося без проскальзывания? Как тогда связаны скорость центра обруча и скорость его нижней точки, и чему равна кинетическая энергия? Центр обруча движется по окружности.

Ответ

$$1) V = 2\sqrt{g(R-r)(1-\cos \alpha)}; \quad 2) N = mg(2 - \cos \alpha).$$

Решение

Заметим, что центр масс обруча движется по окружности радиусом $R - r$. Пусть скорость центра масс обруча при прохождении обручем положения равновесия равна v . Скорость верхней точки обруча в этот момент равна нулю, поскольку обруч движется по бревну без проскальзывания. Таким образом, через верхнюю точку обруча проходит мгновенная ось вращения. Отсюда легко найти, что скорость нижней точки равна $V = 2v$. Движение обруча в этот момент

можно представить как движение центра масс со скоростью v и вращение всех точек обруча в системе отсчёта центра масс также со скоростью v . Кинетическая энергия обруча при таком движении равна $E_k = mv^2$. (Действительно, можно представить, что обруч сначала разогнали поступательно до скорости v , совершив при этом работу $mv^2/2$, а потом в системе отсчёта центра масс раскрутили его, разогнав обод до скорости v , и совершив при этом работу, также равную $mv^2/2$. Суммарная работа в итоге будет равна $E_k = mv^2$.)

При переходе обруча из исходного отклонённого положения в нижнее положение его центр масс опустится на величину

$$h = (R - r)(1 - \cos \alpha).$$

Приравнивая начальную потенциальную энергию обруча его конечной кинетической энергии, получаем:

$$mv^2 = mgh.$$

С учётом выражения для h имеем $v^2 = g(R - r)(1 - \cos \alpha)$, и $v = \sqrt{g(R - r)(1 - \cos \alpha)}$. Следовательно, искомая скорость нижней точки обруча при прохождении им положения равновесия равна

$$V = 2v = 2\sqrt{g(R - r)(1 - \cos \alpha)}.$$

Для ответа на второй вопрос запишем уравнение движения центра масс для момента прохождения им нижней точки траектории в процессе движения по окружности радиусом $R - r$. Центр масс имеет при этом центростремительное ускорение, и

$$ma_{\text{цс}} = m \frac{v^2}{R - r} = mg(1 - \cos \alpha) = N - mg,$$

где N — сила, с которой бревно действует на обруч. В соответствии с третьим законом Ньютона обруч давит на бревно с такой же по модулю силой. Поэтому

$$N = mg(2 - \cos \alpha).$$

3 Кипение воды и дождь

Туристы развели костёр и поставили кипятиться воду в котелке с плоским дном и вертикальными стенками. Когда вода закипела, котелок не сняли с костра, и спустя время $\tau = 8$ мин после начала кипения уровень воды в котелке уменьшился на $h = 2,5$ см. В этот момент начался дождь, но туристы продолжали поддерживать костёр, поскольку группа людей с продуктами задержалась. В каждом кубометре воздуха находится $n = 200$ дождевых капель, которые падают вертикально с постоянной скоростью $v = 9$ м/с. Температура каждой капли равна $t_0 = 20^\circ\text{C}$, а её масса равна $m_0 = 50$ мкг.

1. Будет ли вода в котелке продолжать кипеть после начала дождя? Ответ обоснуйте.
2. Как и за какое время после начала дождя уровень воды в котелке изменится ещё на $H = 1$ см?

Плотность воды $\rho = 1$ г/см³, удельная теплоёмкость воды $c = 4200$ Дж/(кг·°C), удельная теплота парообразования воды $r = 2,2 \cdot 10^6$ Дж/кг. Считайте, что подводимая к воде в котелке тепловая мощность всё время поддерживается постоянной.

Подсказка

Найдите тепловую мощность на единицу площади дна из скорости убыли уровня до дождя. Сравните её с мощностью, нужной, чтобы довести до кипения дождевую воду, падающую на единицу площади в единицу времени.

Ответ

1) вода продолжит кипеть; 2) уровень воды будет увеличиваться, и вырастет на $H = 1$ см за время $T \approx 195$ с.

Решение

Пусть P — тепловая мощность, подводимая к воде в котелке от костра, S — площадь дна котелка. Вычислим величину P/S , то есть тепловую мощность, отнесённую к единице площади. Масса воды, которая испарилась из котелка за время τ , равна $m = \rho Sh$. Количество теплоты, подведённое к воде за это время, равно $P\tau = mr$. Поделив количество теплоты на время, получим мощность: $P = \frac{rm}{\tau} = \frac{r\rho Sh}{\tau}$. Отсюда

$$\frac{P}{S} = \frac{r\rho h}{\tau} \approx 1,15 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2.$$

Теперь выясним, будет ли вода продолжать кипеть после начала дождя, или кипение прекратится. Масса дождевой воды, попадающей в котелок за некоторое время t , равна $M_{\text{дожд}} = Nm_0 = nSvt m_0$, где N — число капель, попадающих в котелок за рассматриваемое время.

Количество теплоты, необходимое для приведения этой воды в состояние кипения, равно

$$Q_1 = cM_{\text{дожд}}(100 - t_0) = cnSvt m_0(100 - t_0).$$

Разделив обе части последнего уравнения на произведение St , получим тепловую мощность, приходящуюся на единицу площади, необходимую для того, чтобы попавшая в котелок дождевая вода закипала:

$$\frac{P_1}{S} = cnvm_0(100 - t_0) \approx 3 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2.$$

Видно, что $\frac{P}{S} > \frac{P_1}{S}$. Это означает, что вода в котелке будет продолжать кипеть и после начала дождя.

Вычислим массу воды, которая будет испаряться за некоторое время t :

$$M_{\text{исп}}(t) = \frac{(P - P_1)t}{r}.$$

Полное изменение массы воды в котелке за время t от начала дождя равно разности масс воды, попавшей в котелок, и испарившейся из него:

$$\Delta M(t) = M_{\text{дожд}}(t) - M_{\text{исп}}(t) = nSvm_0t - \frac{(P - P_1)t}{r}.$$

Изменение уровня воды в котелке за время t от начала дождя равно

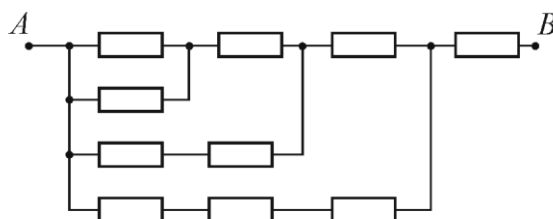
$$\Delta x(t) = \frac{\Delta M(t)}{\rho S} = \frac{1}{\rho} \left(nvm_0 - \frac{P/S - P_1/S}{r} \right) t = kt,$$

где $k \approx 5,14 \cdot 10^{-5}$ м/с — величина в круглых скобках в последнем выражении (с учётом множителя $1/\rho$). Положительный знак коэффициента k означает, что уровень воды в котелке будет увеличиваться. Поэтому время T , за которое уровень воды увеличится на H , равно:

$$T = \frac{H}{k} \approx \frac{10^{-2}}{5,14 \cdot 10^{-5}} \approx 195 \text{ с.}$$

4 Перерезанный провод в цепи

Участок AB электрической цепи, схема которого показана на рисунке, состоит из одинаковых резисторов и проводов, сопротивление которых пренебрежимо мало. Сопротивление этого участка цепи равно $R_1 = 219 \text{ Ом}$. После того, как школьник Вася перерезал один из проводов, сопротивление участка AB стало равным $R_2 = 255 \text{ Ом}$. В каких точках Вася мог перерезать провод? Укажите две такие точки. Ответ обоснуйте.



Подсказка

Найдите сопротивление одного резистора по R_1 . Затем посмотрите, во сколько раз сопротивление «без последнего резистора» должно измениться, и какая часть цепи при этом должна выпасть.

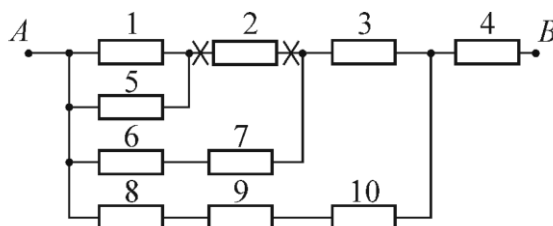
Ответ

Вася мог перерезать провод возле резистора №2 с любой из сторон от него (места показаны на рисунке крестиками).

Решение

Рассмотрим участок AB электрической цепи. Заметим, что он состоит из набора последовательно и параллельно соединённых звеньев.

Пронумеруем резисторы слева направо, начиная с верхнего ряда, так, как показано на рисунке. Обозначим сопротивление каждого из резисторов, из которых состоит участок цепи, через R , и выразим общее сопротивление через R . Будем двигаться вдоль участка цепи слева направо.



Резисторы №1 и №5 соединены параллельно, их общее сопротивление равно $R/2$. Затем последовательно к ним подсоединён резистор №2, что даёт общее сопротивление $3R/2$. Далее к ним параллельно подключены два последовательно соединённых резистора №6 и №7, с их учётом сопротивление равно $\frac{(3R/2) \cdot 2R}{(3R/2) + 2R} = \frac{6R}{7}$. Добавляя последовательно соединённый резистор №3, получим сопротивление $13R/7$. Далее параллельно к полученному участку подсоединяются три последовательно включённых резистора №8, №9 и №10, что даёт сопротивление $\frac{(13R/7) \cdot 3R}{(13R/7) + 3R} = \frac{39R}{34}$. Наконец, путём последовательного подключения резистора №4, получим сопротивление всего участка цепи:

$$R_{AB} = \frac{39R}{34} + R = \frac{73R}{34} = R_1$$

(согласно условию, оно равно $R_1 = 219 \text{ Ом}$). Отсюда $R = 102 \text{ Ом}$.

Вычислим отношение $\frac{R_2}{R} = \frac{255}{102} = \frac{5}{2}$. Заметим, что резистор №4 добавляет к общему сопротивлению участка AB сопротивление R . Если этот резистор мысленно удалить, то сопротивление оставшегося участка цепи будет превышать R в $\frac{R_2 - R}{R} = \frac{3}{2}$ раза. Следовательно, участок цепи, который остаётся после мысленного удаления резистора №4, после перерезания одного провода может состоять, например, из двух параллельно соединённых ветвей, каждая из которых содержит три последовательно включённых резистора. Обратим внимание на параллельные ветви цепи с резисторами №6, №7, №3 и №8, №9, №10. Сопротивление этих двух ветвей без резисторов №1, №2 и №5 равно как раз $3R/2$.

Таким образом, для удовлетворения условию задачи нужно исключить резисторы №1, №2 и №5 путём перерезания одного провода. Следовательно, Вася мог перерезать провод возле резистора №2 с любой из сторон от него (соответствующие места показаны на рисунке крестиками).

5 Давление света на зеркальный шар

Шар радиусом R с зеркальной поверхностью освещают широким параллельным пучком света. Какую часть шара, и каким образом нужно покрасить чёрной краской, чтобы сила светового давления на шар оказалась максимальной?

Подсказка

Сравните, на сколько меняется проекция импульса фотона на направление пучка при зеркальном отражении и при поглощении, в зависимости от угла падения. Где какой вариант «выгоднее»?

Ответ

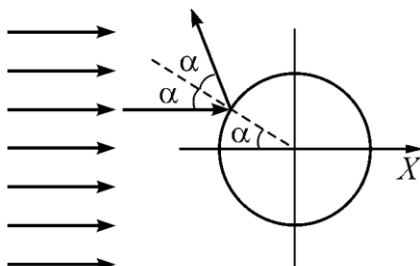
Зеркальной следует оставить поверхность шара в пределах центрального шарового сегмента высотой $h = R \left(1 - \frac{1}{\sqrt{2}}\right) \approx 0,3R$; остальную часть шара, на которую попадает свет, нужно покрасить чёрной краской.

Решение

Рассматривая свет как поток частиц (фотонов), запишем для силы светового давления на шар:

$$\vec{F} = -\frac{\Delta \vec{P}}{\Delta t},$$

где $\Delta \vec{P}$ — изменение импульса фотонов за время Δt в результате их отражения или поглощения поверхностью шара.



При зеркальном отражении фотона, падающего на шар под углом падения α (см. рис.), проекция его импульса на ось X (которая совпадает с направлением падающего пучка) изменяется на величину:

$$\Delta p_x = -p \cos(2\alpha) - p,$$

где p — импульс фотона в падающем пучке. Если же фотон поглощается поверхностью шара, то изменение его импульса равно $\Delta p_x = -p$.

Сравнивая эти два случая, видим, что при $\alpha < \pi/4$ изменение проекции импульса $|\Delta p_x|$ больше при зеркальном отражении, а при $\alpha > \pi/4$ сильнее изменяется проекция импульса при поглощении фотона. Поэтому для получения максимальной силы давления фотоны, падающие под углами $\alpha < \pi/4$, «выгоднее» отразить, а фотоны с большими углами падения — поглотить.

Действительно, пусть передняя поверхность шара в пределах углов падения от 0 до $\alpha_0 = \pi/4$ зеркальная, а остальная поверхность покрашена. Мысленно увеличим граничный угол α_0 на малую величину $\Delta\alpha$, сдвинув границу окрашивания. В результате этого узкая полоска поверхности шара «превратится» из окрашенной в зеркальную. Пусть на эту полоску в единицу времени падает N фотонов. Тогда из-за сдвига границы проекция на ось X импульса, передаваемого шару отражёнными фотонами, возрастёт на

$$(\delta p_x)_{\text{отр}} = N[p + p \cos(2(\alpha_0 + \Delta\alpha))] = N\left[p + p \cos\left(\frac{\pi}{2} + 2\Delta\alpha\right)\right] = N[p - p \sin(2\Delta\alpha)],$$

а проекция на ось X импульса, передаваемого шару поглощёнными фотонами, уменьшится на $(\delta p_x)_{\text{погл}} = Np$. Итоговое изменение проекции на ось X импульса, передаваемого шару фотонами, изменится на $\delta p_x = (\delta p_x)_{\text{отр}} - (\delta p_x)_{\text{погл}} = -Np \sin(2\Delta\alpha)$, то есть уменьшится. Значит, уменьшится и сила светового давления на шар. Если же мысленно уменьшить граничный угол α_0 на малую величину $\Delta\alpha$, сдвинув границу окрашивания в другую сторону, то проекция на ось X импульса, передаваемого шару поглощёнными фотонами, увеличится на $(\delta p_x)_{\text{погл}} = Np$, а проекция на ось X импульса, передаваемого шару отражёнными фотонами, уменьшится на

$$(\delta p_x)_{\text{отр}} = N[p + p \cos(2(\alpha_0 - \Delta\alpha))] = N\left[p + p \cos\left(\frac{\pi}{2} - 2\Delta\alpha\right)\right] = N[p + p \sin(2\Delta\alpha)].$$

Итоговое изменение проекции на ось X импульса, передаваемого шару фотонами, изменится на $\delta p_x = (\delta p_x)_{\text{погл}} - (\delta p_x)_{\text{отр}} = -Np \sin(2\Delta\alpha)$, то есть опять уменьшится. Значит, и в этом случае сила светового давления на шар уменьшится. Таким образом, сила светового давления при $\alpha = \alpha_0 = \pi/4$ действительно является максимальной.

Итак, заднюю (теневую) поверхность шара можно «красить» как угодно, это не влияет на силу давления, а освещённую поверхность следует оставить зеркальной в пределах центрального шарового сегмента высотой

$$h = R \left(1 - \cos \frac{\pi}{4}\right) = R \left(1 - \frac{1}{\sqrt{2}}\right) \approx 0,3R.$$

6 Труба с верёвкой на наклонной плоскости

С наклонной плоскости без проскальзывания скатывается тонкостенная труба, наматывая на себя сверху лёгкую и тонкую верёвку, которую можно считать нерастяжимой. Свободный конец верёвки прикреплён к бруску, лежащему на плоскости выше трубы. Масса трубы M , масса бруска $M/2$. Ось трубы горизонтальна, свободный участок верёвки параллелен наклонной плоскости и перпендикулярен оси трубы. Плоскость составляет с горизонтом угол $\alpha = 30^\circ$. Ускорение, с которым поступательно движется брусок вслед за трубой, равно $0,3g$. Чему равен коэффициент трения μ между бруском и плоскостью?

Подсказка

Верёвка наматывается сверху на катящуюся трубу: как связаны скорости и ускорения бруска и оси трубы? Удобно записать закон изменения механической энергии, помня про энергию катящейся тонкостенной трубы.

Ответ

$$\mu = \frac{4\sqrt{3}}{15} \approx 0,46.$$

7 Цикл холодильной машины с политропами

Один моль идеального газа участвует в циклическом процессе $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1$ холодильной машины. В состоянии 1 газ имеет температуру T_1 и объём V_1 . Известно, что все переходы газа из одного состояния в другое — политропические. Показатель политропы процесса $2 \rightarrow 3$ на единицу больше показателя политропы процесса $1 \rightarrow 2$ и на единицу меньше показателя политропы процесса $3 \rightarrow 1$. В процессе $1 \rightarrow 2$ объём газа уменьшается в k раз. Один из процессов цикла — изотермический.

1. Определите объём газа в состоянии 3.
2. Изобразите на pV -диаграмме цикл, соответствующий условию задачи, указав для каждого из процессов его показатель политропы.
3. Чему может быть равна температура газа в состоянии 3?

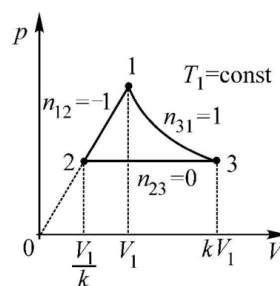
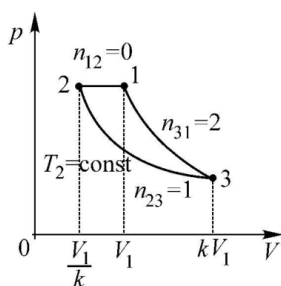
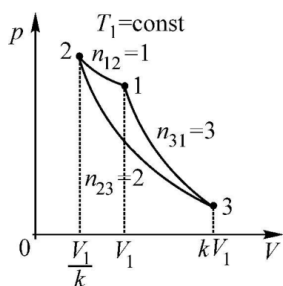
Справка: политропическим называется процесс, в течение которого теплоёмкость газа не изменяется: $C = \text{const}$. Уравнение такого процесса имеет вид $pV^n = \text{const}$, или $p_1 V_1^n = p_2 V_2^n$. Величину n называют показателем политропы.

Подсказка

Обозначьте показатели политроп через n , $n+1$, $n+2$ и запишите связь T и V вдоль каждого процесса: $TV^{n-1} = \text{const}$. Замкнутость цикла по объёму и условие изотермичности одного из процессов дают возможные n .

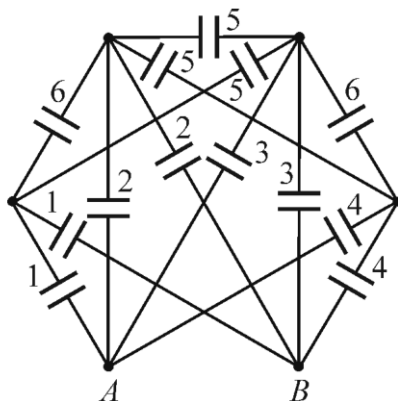
Ответ

1) $V_3 = kV_1$; 2) три возможные pV -диаграммы показаны на рисунке; 3) температура газа в состоянии 3 может быть равна $T_3 = \frac{T_1}{k^2}$, $T_3 = \frac{T_1}{k}$ или $T_3 = T_1$ (в порядке следования диаграмм).



8 Ёмкость сложной цепочки конденсаторов

Найдите электрическую ёмкость участка AB цепи, схема которого приведена на рисунке. Ёмкости конденсаторов указаны на схеме в мкФ, ёмкостью соединительных проводов можно пренебречь. Провода соединены только в местах, обозначенных точками.



Подсказка

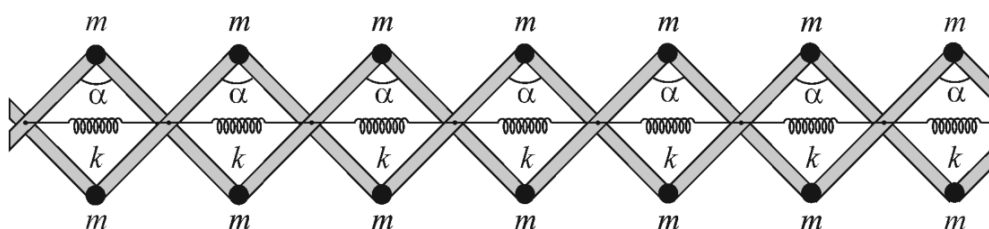
Пусть к точкам A и B подключён источник. Есть ли в схеме точки с одинаковым потенциалом? Если да, конденсаторы между ними можно выбросить.

Ответ

$C_{AB} = 5$ мкФ.

9 Шарнирная цепочка с пружинами

Шарнирная конструкция состоит из очень большого числа N периодически повторяющихся одинаковых звеньев (см. рис.). Каждое звено включает в себя пружину, концы которой прикреплены к серединам двух пар скрещенных реек, два сферических шарнирных блока и четыре половинки самих реек. Шарнирные блоки дают возможность рейкам свободно вращаться в пространстве. Жёсткость каждой из пружин равна k , масса каждого из шарнирных блоков равна m , все остальные элементы невесомаы, трения нигде нет. Когда пружины не деформированы, рейки образуют между собой угол α . Концы этой конструкции соединили между собой, образовав большое кольцо, так, что пружины расположились вокруг цилиндрической поверхности. Получившаяся система колеблется таким образом, что в каждый момент времени все пружины сжаты или растянуты одинаково. Найдите период этих колебаний вокруг положения равновесия, считая их малыми. Система находится в невесомости.



Подсказка

Выберите одну координату (например, длину пружины или угол между рейками), выразите через неё потенциальную и кинетическую энергии всей системы и сведите задачу к гармоническому осциллятору.

Ответ

Период малых колебаний системы равен $T = N\sqrt{\frac{2m}{k}}$.

10 Видимая толщина канала в ручке

Внутри прозрачного шестигранного корпуса шариковой ручки имеется круглый канал, заполненный чернилами. При рассматривании тёмного канала через прозрачный корпус было отмечено, что вращение корпуса вокруг его оси симметрии приводит к изменению видимой толщины канала с чернилами. Ширина видимой тёмной полосы максимальна, когда ближайшее ребро шестигранника, ось симметрии ручки и глаз наблюдателя лежат в одной плоскости. Отношение максимальной видимой толщины канала к его минимальной видимой толщине при неизменном расстоянии от ручки до глаза (которое во много раз больше толщины ручки) равно двум. Отношение диаметра d канала к длине L стороны шестигранника равно $d/L = \sqrt{3}/4$. Найдите показатель преломления n материала, из которого сделан корпус.

Подсказка

Минимальная видимая ширина равна настоящему диаметру: канал виден через одну грань. Для максимальной ширины проследите крайний луч, идущий от канала через середины двух соседних граней.

Ответ

$$n = \sqrt{2}.$$