ОЛИМПИАДА ШКОЛЬНИКОВ «ПОКОРИ ВОРОБЬЕВЫ ГОРЫ» по ФИЗИКЕ
ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЙ (ФИНАЛЬНЫЙ) ЭТАП 2024 года

БИЛЕТ № 07 (7-9 классы): решения и критерии.

Критерии оценивания:

Для вопросов:

Есть отдельные правильные соображения – **1 балл.**

Ответ в целом правилен, но содержит существенные неточности, или существенно неполон, или отсутствует обоснование (для вопросов, в которых необходимо обоснование) – **2 балла.**

Ответ правилен, но присутствуют мелкие неточности, или ответ недостаточно полон, или отсутствует достаточное обоснование (для вопросов, в которых необходимо обоснование) – **3 балла.**

Ответ полностью правильный, но недостаточно обоснованный (для вопросов, в которых необходимо обоснование) – **4 балла.**

Правильный, полный и обоснованный ответ – **5 баллов (максимальная оценка).**

Для задач:

Есть отдельные правильные соображения – **1-2 балла.**

Есть часть необходимых для решения соображений, решение не закончено или содержит серьезные ошибки – **3-4 балла.**

Присутствует большая часть необходимых для решения соображений, правильно записана часть необходимых соотношений, решение не закончено или содержит ошибки – **5-7 баллов.**

Присутствуют все необходимые для решения соображения, правильно записаны почти все необходимые для решения исходные уравнения, но решение не закончено или содержит ошибки – **8-10 баллов.**

Присутствуют все необходимые для решения соображения, правильно записаны все необходимые для решения исходные уравнения, решение выстроено правильно с физической и логической точки зрения, но содержит ошибки – **11-14 баллов.**

Присутствуют все необходимые для решения соображения, правильно записаны все необходимые для решения исходные уравнения, решение выстроено правильно с физической и логической точки зрения, но содержит одну-две мелкие неточности, не позволившие получить правильный ответ, или правильное решение с недостаточным обоснованием существенных использованных результатов – **15-17 баллов.**

Правильное обоснованное решение с верным аналитическим ответом, но мелкой неточностью при получении численного ответа, либо правильное решение с правильными ответами с недостаточным обоснованием одного из использованных результатов (из числа не ключевых для решения, но необходимых) – **18-19 баллов.**

Полное, правильное, обоснованное решение с правильными ответами – **20 баллов (максимальная оценка).**

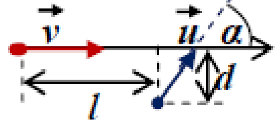
Максимальная оценка за работу: 100 баллов.

УСЛОВИЯ, ВОЗМОЖНЫЕ РЕШЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАЧИСЛЯЕМЫХ БАЛЛОВ ДЛЯ ЗАДАЧ:

Задание 1:

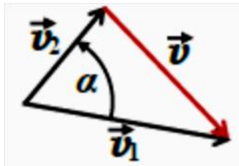
Вопрос: Чему равна относительная скорость двух шариков, летящих со скоростями 5 м/с и 3 м/с, если угол между направлениями их движения равен 60°?

Задача: Пилот космического корабля, летевшего прямолинейно со скоростью v = 50 км/с (в системе отсчета, связанной с Солнцем), заметил впереди крупный болид, летевший со скоростью u = 25 км/с, движущийся под углом α = 60° к курсу корабля. В момент обнаружения болид находился на расстоянии d = 200 км от ближайшей к нему точки курса корабля, а эта точка находилась на



расстоянии l = 350 км от корабля (см. рисунок). На каком минимальном расстоянии друг от друга пройдут корабль и болид, если корабль не будет изменять свою скорость?

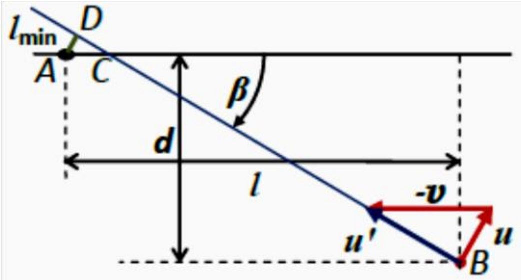
Ответ на вопрос: Вектор относительной скорости для поступательно движущихся тел равен разности векторов скоростей тел. Поэтому



$$|\vec{v}| = \sqrt{(\vec{v}_1 - \vec{v}_2)^2} = \sqrt{v_1^2 + v_2^2 - 2v_1v_2 \cdot \cos(\alpha)},$$

или $|\vec{v}| = \sqrt{19}$ м/с $\approx 4{,}36$ м/с. Ясно, что аналогичный результат дает, например, использование теоремы косинусов для треугольника скоростей.

Решение задачи: Перейдем в Систему Отсчета, связанную с кораблем. Скорость болида в этой СО $\vec{u}' = \vec{u} - \vec{v}$. Как ясно из анализа векторного треугольника, угол β между направлением АС движения корабля относительно исходной СО и линией BD относительного движения болида равен 30° (действительно, перпендикулярная АС составляющая $\vec{u}'$ равна $\frac{\sqrt{3}}{2}u$, а параллельная равна $v - \frac{1}{2}u = \frac{3}{2}u$, то есть $\text{tg}(\beta) = \frac{2v-u}{u\sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{3}}$). Минимальное расстояние между кораблем и болидом не зависит от выбора СО, и в нашей СО оно равно длине перпендикуляра AD, опущенного на линию относительного движения болида. Как видно, $|AC| = l - d \cdot \text{ctg}(\beta)$. Теперь легко найти $l_{min} = |AC| \cdot \sin(\beta) = l \cdot \sin(\beta) - d \cdot \cos(\beta) = \frac{l - d\sqrt{3}}{2} \approx 1795$ м. Менее двух километров – очень близко при таких скоростях!



Ответ: $l_{min} = \frac{l - d\sqrt{3}}{2} \approx 1795$ м.

Критерии для задачи:

I	Произведен переход в СО, связанную с одним из тел	**1**
	Правильно построен векторный треугольник скоростей	**2**
	Правильно определен угол β, или другой параметр характеризующий направление относительного движение	**3**
	Предложен корректный способ определения минимального расстояния (сделан поясняющий рисунок или корректно записаны уравнения, из которых может быть определена эта величина)	**4**
II	Получено уравнение, эквивалентное $|AC| = l - d \cdot \text{ctg}(\beta)$	**3**
	Записано выражение, эквивалентное $l_{min} = |AC| \cdot \sin(\beta)$	**2**
	Получен правильный аналитический ответ	**3**
	Получен правильный численный ответ	**2**
	ВСЕГО	**20**

Задание 2:

Вопрос: Что такое «насыщенный пар»? От чего зависит плотность насыщенного водяного пара?

Задача: В теплоизолирующем вертикальном цилиндре с гладкими стенками под теплоизолирующим поршнем находился насыщенный водяной пар с температурой 100°С. С помощью специального приспособления в цилиндр, не нарушая теплоизоляции, добавили маленький кусочек льда с температурой 0°С. На какое расстояние опустится поршень в процессе установления равновесия? Известно, что, если бы этот кусочек льда растаял в этом цилиндре без поршня при нормальной температуре, то он создал бы на дне цилиндра слой воды толщиной h = 0,2 мм, и что давление над поршнем не изменялось. Используйте следующие данные: удельная теплота плавления льда при 0°С $\lambda \approx 340$ кДж/кг, удельная теплоемкость воды c_B = 4,2 кДж/(кг·°С), удельная теплота парообразования воды при 100°С $r \approx 2260$ кДж/кг, плотность насыщенного водяного пара при 100°С $\rho \approx 0{,}59$ кг/м^3, плотность жидкой воды ρ_0 = 1000 кг/м^3. Давление насыщенного водяного пара зависит только от его температуры и при 100°С равно $p_0 \approx 101$ кПа.

Ответ на вопрос: Насыщенный пар – пар, находящийся в равновесии со своей жидкостью. Динамическое равновесие между паром и жидкостью (при котором количество молекул, переходящее за «большое» с точки зрения молекул время из пара в жидкость, равно количеству молекул, переходящих за то же время из жидкости в пар) устанавливается при разных скоростях движения молекул при разных их концентрациях в паре. Плотность пара пропорциональна концентрации молекул, а скорости их движения зависят от температуры. Поэтому условие равновесия устанавливает однозначную связь между плотностью насыщенного пара и его температурой. При этом в устойчивых равновесных состояниях плотность пара не может быть больше плотности насыщенного пара, соответствующей его температуре – при превышении плотности насыщенного пара его состояние становится неустойчивым, и через небольшое время начинается конденсация пара, за счет которой плотность уменьшается до значения плотности насыщенного пара. Можно отметить, что все характеристики насыщенного пара, зависящие от концентрации и скорости движения молекул, тоже можно рассматривать как функции только одного параметра – температуры (см., например, указание про давление насыщенного пара в условии задачи).

Решение задачи: В первую очередь обратим внимание, что давление пара под поршнем не должно изменяться, поскольку неизменны внешнее давление и сила тяжести, действующая на поршень. Поскольку пар изначально был насыщенным, и под поршень еще добавили воды (в твердой фазе), то пар должен остаться насыщенным. В результате мы доказали, что температура пара в конечном состоянии будет равна начальной, то есть 100°C. Значит, после помещения кусочка льда под поршень он должен полностью растаять и образовавшаяся вода должна нагреться до этой температуры. Так как вода теплоизолирована, то энергия на таяние льда и нагрев воды будет получена за счет конденсации пара. Учитывая соотношение плотностей пара и жидкой воды (почти 1700), мы понимаем, что объем воды, образовавшейся при конденсации пара и таянии льда, будет намного меньше объема сконденсировавшегося пара – именно из-за этого поршень и опускается. Запишем уравнение теплового баланса:

$$r \cdot \rho \Delta V_n = (\lambda + c \cdot \Delta t) \cdot m_{Л}.$$

Здесь $\Delta t = 100℃$ – изменение температуры воды, образовавшейся при таянии льда. Масса льда, как ясно из условия, связана с сечением цилиндра S соотношением $m_{Л} = \rho_0 Sh$. Изменение объема пара можно (пренебрегая объемом жидкой воды под поршнем) выразить через искомую величину – сдвиг поршня по вертикали: $\Delta V_n = S \cdot \Delta H$. Таким образом,

$$r \cdot \rho \Delta H \approx (\lambda + c \cdot \Delta t) \cdot \rho_0 h \Rightarrow \Delta H \approx \frac{(\lambda + c \cdot \Delta t) \cdot \rho_0}{r \cdot \rho} h \approx 11{,}4 \text{ см.}$$

Как видно, эта величина вовсе не является малой, и наш цилиндр должен иметь большую высоту, чтобы установление равновесия было возможно без полной конденсации пара.
В условии дано давление насыщенного пара, поскольку ученики 8-9 класса могут не знать о том, что в удельной теплоте парообразования учтена работа пара при расширении в ходе испарения и работа над паром при его сжатии в ходе конденсации. Зная давление, они могут убедиться, что вклад этой работы в ответ не очень существенен (менее 8%).

Ответ: $\Delta H \approx \frac{(\lambda + c \cdot \Delta t) \cdot \rho_0}{r \cdot \rho} h \approx 11$ см.

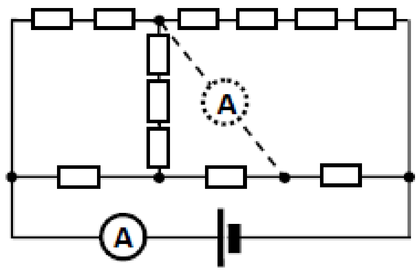
Критерии для задачи:

I	Указано (используется в решении), что давление пара под поршнем не должно изменяться	**1**
	Сделан вывод, что температура пара в конечном состоянии будет равна начальной, то есть 100°C	**3**
	Обосновано, что объемом образовавшейся воды можно пренебречь	**1**
	Указано (используется в решении), что лед должен полностью растаять и образовавшаяся вода должна нагреться до температуры 100°C	**2**
	Указано, что энергия на таяние льда и нагрев воды будет получена за счет конденсации пара	**2**
	Сделан вывод, что поршень опускается из-за того, что объем воды, образовавшейся при конденсации пара и таянии льда, будет намного меньше объема сконденсировавшегося пара	**1**
II	Правильно записано УТБ	**3**
	Записано правильное выражение для массы льда	**2**
	Записана правильная связь ΔH и 4	**1**
	Получен правильный аналитический ответ	**2**
	Получен правильный численный ответ	**2**
	ВСЕГО	**20**

Задание 3:

Вопрос: Известно, что ЭДС источника постоянного тока равна $\mathcal{E}$ = (4,50 ± 0,02) В, а его внутреннее сопротивление равно r = (0,50 ± 0,05) Ом. К этому источнику подключили амперметр, и он показал величину силы тока I = (5,0 ± 0,2) А. Определите внутреннее сопротивление амперметра и оцените ошибку Вашего результата.

Задача: Из 12 одинаковых резисторов и аккумулятора собрана схема, показанная на рисунке. У нас есть практически идеальный амперметр. Если подключить его непосредственно к аккумулятору, то он покажет силу тока I_0 = 11 А. Если включить его в схему так, как показано на рисунке, то его показания изменятся на I = 1,1 А. Определите показания амперметра после переноса его в положение, показанное пунктиром (ветвь с источником при этом не разрывается). Сопротивление соединительных проводов пренебрежимо мало.



Ответ на вопрос: По закону Ома для полной цепи

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_A + r} \Rightarrow R_A = \frac{\mathcal{E}}{I} - r = 0{,}4\ \text{Ом}.$$

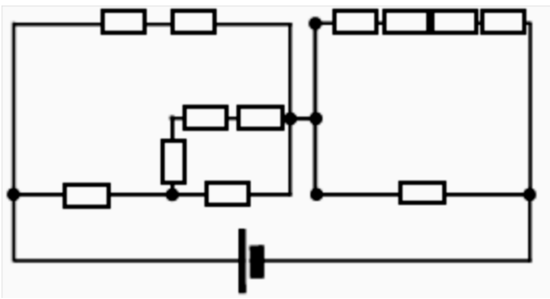
Точность результата можно оценить разными методами, в то числе и с помощью интервальных оценок. Например, ясно, что

$$\frac{4{,}48\ \text{В}}{5{,}2\ \text{Ом}} - 0{,}55\ \text{Ом}\ \approx 0{,}31\ \text{Ом} < R_A < \frac{4{,}52\ \text{В}}{4{,}8\ \text{Ом}} - 0{,}45\ \text{Ом}\ \approx 0{,}49\ \text{Ом}.$$

Таким образом, $R_A \approx$ (0,40 ± 0,09) Ом. Важно обратить внимание, что влияние неточности на результат наиболее сильно при наличии поправки к знаменателю, причем оно тем сильнее, чем этот знаменатель меньше.

Решение задачи: У «практически идеального» амперметра внутреннее сопротивление можно считать равным нулю. Поэтому $\mathcal{E} \approx I_0 r$, где r – внутреннее сопротивление источника. Схема на рисунке – это сбалансированный мост: общее напряжение делится в одинаковом соотношении на «нижнем» и «верхнем» берегу, так что ток через «тройной» резистор не течет. Поэтому полное сопротивление цепи равно сопротивлению пары параллельно соединенных резисторов с сопротивлениями 6R и 3R. Значит, $R_1 = 2R$, и $I = \frac{\mathcal{E}}{r+2R} = \frac{r}{r+2R} I_0 \Rightarrow R = n \cdot r$, где $n = \frac{I_0 - I}{2I} = \frac{9}{2}$.

После перестановки амперметра он закорачивает соединенные точки, и схема приобретает следующий вид:



Здесь расчет схемы сводится к анализу последовательных и параллельных соединений. Сопротивление правой части схемы $R_{пр}$ = 4R/5, а для левой части схемы

$$\frac{1}{R_л} = \frac{1}{2R} + \frac{1}{R + 3R/4} \Rightarrow R_л = \frac{14}{15} R \Rightarrow R_2 = \frac{26}{15} R \Rightarrow I_2 = \frac{\mathcal{E}}{r + R_2} = \frac{5}{44} I_0.$$

В нижнюю ветвь левой части затекает $\frac{8}{15} I_2$, и в ветвь с одним резистором – $\frac{3}{4}\frac{8}{15} I_2 = \frac{1}{22} I_0$. Наконец, в нижней ветви правой части течет ток с силой $\frac{4}{5} I_2 = \frac{1}{11} I_0$. Как видно из схемы, именно разность двух последних токов дает ток, текущих через амперметр: $I_A = \frac{1}{22} I_0 = 0{,}5$ А.

Ответ: $I_A = \frac{1}{22} I_0 = 0{,}5$ А.

Критерии для задачи:

	Указано (используется в решении), что сопротивлением амперметра можно пренебречь	**1**
	Записано уравнение для тока КЗ источника	**1**

I	Указано (используется в решении), что первая схема ест сбалансированный мост	3
	Указано (используется в решении), что во второй схеме амперметр закорачивает точки, к которым подключен.	2
	Правильно изображена (или описана) эквивалентная схема для второго случая.	3
II	Правильно рассчитано общее сопротивление для первой схемы.	2
	Правильно рассчитаны эквивалентные сопротивления правой и левой части второй схемы	2
	Правильно рассчитано общее сопротивление для втор ой схемы	2
	Получено правильное выражение (уравнение) для силы тока через амперметр	2
	Получен правильный численный ответ	2
	ВСЕГО	**20**

Задание 4:

Вопрос: Прочный (практически недеформируемый) стакан, находившийся в воздухе, перевернули вверх дном и опустили целиком в воду. Оказалось, что сила Архимеда больше силы тяжести, действующей на стакан с воздухом. Может ли быть, что при опускании на некоторую глубину сила Архимеда станет меньше этой силы тяжести? Ответ объяснить.

Задача: В широкий сосуд с водой помещен тонкий стержень постоянного сечения из очень легкого материала – его плотность в $n = 9$ раз меньше плотности воды. Стержень шарнирно закреплен на дне сосуда (то есть он может без трения вращаться вокруг горизонтальной оси шарнира). Первоначально уровень воды в сосуде равнялся длине стержня, и стержень располагался вертикально. Затем уровень воды начали плавно (с постоянной скоростью u, которая значительно меньше скорости, которую набрал бы стержень, падая в отсутствие воды) понижать. Найдите закон изменения с течением времени угла отклонения стержня от вертикали $\alpha(t)$.

Ответ на вопрос: В перевернутом стакане под водой может оставаться воздух, и если на небольшой глубине сила Архимеда была больше силы тяжести, то этот воздух создавал большую часть «погруженного объема. С увеличением глубины погружения увеличивается внешнее давление на воздух в стакане, объем воздуха уменьшается, и вместе с ним уменьшается сила Архимеда. В результате она может стать меньше силы тяжести. Тогда перевернутый стакан, который при небольшом погружении сразу всплывал, при достаточно большом погружении может утонуть.

Решение задачи: Так как снижение уровня воды происходит плавно, то в каждый момент времени стержень находится в «квазиравновесном» состоянии. Тогда сумма моментов сил тяжести и Архимеда относительно оси шарнира должна равняться нулю. Запишем это условие для момента времени *t*, в который уровень воды с плотностью ρ_0 равен $h = h_0 - u \cdot t.$, а угол отклонения стержня от вертикали равен α. Тогда получим:

$$+F_A \frac{1}{2} h \cdot \mathrm{tg}(\alpha) - mg\frac{1}{2} h_0 \cdot \sin(\alpha) = 0.$$

Поскольку $F_A = \rho_0 \frac{h}{\cos(\alpha)} Sg$, а $m = \rho S h_0 = \frac{1}{9}\rho_0 S h_0$, то $\cos^2(\alpha) = 9\left(1 - \frac{ut}{h_0}\right)^2$. Значит, угол отклонения стержня о вертикали $\alpha(t) = \arccos\left[3\left(1 - \frac{ut}{h_0}\right)\right]$. Конечно, косинус угла не может быть больше 1, так что для моментов времени, когда

$$3\left(1 - \frac{ut}{h_0}\right) > 1 \Rightarrow t < \frac{2}{3}\frac{h_0}{u}$$

стержень остается вертикальным (α = 0), а затем начинает отклоняться. К моменту времени $t_0 = \frac{h_0}{u}$ уровень воды понижается до нуля, и стержень ложится на дно.

Ответ: $$\alpha(t) = \begin{cases} 0, & t < \frac{2}{3}\frac{h_0}{u} \\ \alpha(t) = \arccos\left[3\left(1 - \frac{ut}{h_0}\right)\right], & \frac{2}{3}\frac{h_0}{u} \le t \le \frac{h_0}{u}. \\ 90^\circ, & t > \frac{h_0}{u} \end{cases}$$

Критерии для задачи:

I	Указано (используется в решении), что можно использовать квазистатическое приближение	**2**
	Указано, что можно использовать условие равенства нулю суммарного момента относительно шарнира.	**3**
	Замечено, что существует участок значений времени, когда стержень остается вертикальным	**3**
	Указан момент времени, когда стержень «ляжет» на дно сосуда	**2**
II	Используется правильное выражение для силы Архимеда.	**3**
	Правильно записано уравнение моментов	**2**
	Получено правильное уравнение, позволяющее найти связь угла отклонения и времени	**2**
	Правильно указан момент начала наклона стержня.	**2**
	Получен правильный и полный ответ	**2**
	ВСЕГО	**20**