10-11 классы, подготовка к теоретическому туру

олимпиады школьников «Робофест» по физике

Теоретический обзор к итоговому занятию основного курса.

Тема: «ОЛИМПИАДНЫЕ ЗАДАНИЯ ОЛИМПИАДЫ ДЛЯ 10-11 КЛАССОВ И РАБОТА С НИМИ».

Заключительное (и самое важное с точки зрения определения победителей и призеров) из испытаний олимпиады «Робофест» - теоретический тур финального этапа. Задание теоретического тура состоит из 4 заданий по четырем темам (законы сохранения в механике, молекулярная физика, движение жидкости и электромагнитная индукция). Каждое задание состоит из «простого» вопроса и задачи. Важная информация для участников состоит в том, что «простые» вопросы выбраны таким образом, чтобы подвести их к решению более сложной задачи. Всегда следует начинать работу над заданием с ответа на вопрос, а потом уже приступать к решению задачи.

Второе важное обстоятельство - то, что многие задания теоретического тура **финального этапа** связаны логически с заданиями по физике **отборочного этапа**, с которыми участники олимпиады уже сталкивались в ходе региональных отборов. Поэтому в ходе подготовки к финалу обязательно нужно проработать задания отборочного этапа. Это, помимо самой подготовки, также позволить понять, какие именно темы могут быть затронуты в каждом из заданий. Обсудим возможные темы финального задания.

Тема 1: раздел – механика, тема – законы сохранения.

В первую очередь надо повторить материалы, посвященные волнам, в занятии вводного курса по темам «закон сохранения импульса» и «закон сохранения энергии».

Вопрос: Два одинаковых шарика, выпущенных из катапульт, столкнулись «лоб в лоб» в тот момент, когда оба летели горизонтально. Непосредственно перед ударом величины скоростей шаров равнялись $v_1 = 5$ м/с и $v_2 = 2$ м/с. Какой после удара стала величина скорости второго шара (то есть того, который до удара двигался со скоростью 2 м/с)? Удар считайте упругим.

Ответ: После лобового упругого удара тела движутся вдоль той же прямой, что и перед ударом (ось *x*). Их скорости до и после удара (в проекциях на ось *x*) связаны законами сохранения энергии и импульса. При одинаковых массах эти законы приводят к уравнениям:

$$\left\{\begin{array}{c} mv_1' + mv_2' = mv_1 + mv_2 \\ \dfrac{mv_1'^2}{2} + \dfrac{mv_2'^2}{2} = \dfrac{mv_1^2}{2} + \dfrac{mv_2^2}{2} \end{array}\right\} \Rightarrow \left\{\begin{array}{l} v_1' + v_2' = v_1 + v_2 \\ v_1'^2 + v_2'^2 = v_1^2 + v_2^2 \end{array}\right. .$$

Ясно, что эта система имеет два решения относительно «новых» скоростей, и они легко угадываются: это «старые» скорости $v_1' = v_1$ и $v_2' = v_2$ (соответствует отсутствию удара) или «обмен скоростями» $v_1' = v_2$ и $v_2' = v_1$ (если удар произошел). Таким образом, скорость второго шара после удара равна скорости первого шара до удара.

Задача:

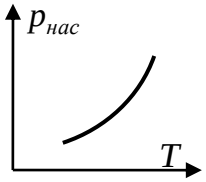
Решение:

Тема 2: раздел – молекулярная физика, тема – влажный воздух.

Полезно повторить материалы занятия вводного курса по теме «Фазовые переходы. Пары и жидкости».

Вопрос: Что такое насыщенный пар? Как зависит давление насыщенного пара от температуры?

Ответ: Насыщенным называют пар, находящийся в равновесии со своей жидкостью Это равновесие динамическое – молекулы постоянно переходят из пара в жидкость и обратно, но в равновесии эти потоки в среднем уравновешиваются. Соответственно на границе жидкости с ненасыщенным паром доминирует испарение – жидкость переходит в пар, и пар в присутствии жидкости со временем становится насыщенным. Выходу молекул из жидкости в пар препятствуют межмолекулярные силы притяжения, и для интенсивного испарения жидкости обычно нужно сообщать энергию (теплоту парообразования) для увеличения потенциальной энергии взаимодействия молекул. При увеличении температуры увеличивается кинетическая энергия молекул, и они легче преодолевают притяжение соседей. Поэтому переход молекул из жидкости в пар становится намного интенсивнее, и динамическое равновесие устанавливается при более высокой плотности насыщенного пара. Вместе с плотностью и температурой пара растет нелинейным образом давление насыщенного пара (давление, плотность и абсолютная температура пара с молярной массой μ связаны соотношением $p = \frac{\rho RT}{\mu}$). Типичная форма графика зависимости $p_{нас}(T)$ показана на рисунке.



Задача: Перед соревнованиями зал, где они будут проходить, проветрили, закрыли окна и двери, и включили нагревательные приборы. Когда температура установилась, климатическое панно, висящее в зале, что она равна $t = 20°\text{C}$, но воздух очень сухой – относительная влажность равнялась $r = 15\%$. Для создания более комфортных условий включили увлажнители воздуха и увеличили относительную влажность до $r' = 50\%$. Температуру при этом сохранили неизменной. Найдите массу воды, которую испарили для увеличения влажности. Объем зала $V = 800\,\text{м}^3$, молярная масса воды $\mu = 18\,\text{г/моль}$, универсальная газовая постоянная $R \approx 8{,}31\,\text{Дж/(моль·К)}$. Давление насыщенных паров воды при температуре зала $p_н = 2{,}34\,\text{кПа}$.

Решение:

Из уравнения Менделеева-Клапейрона $pV = \frac{m}{\mu}RT$ можно выразить массу пара в зале через давление этого пара $m = \frac{\mu pV}{RT}$. Давление пара можно определить по относительной влажности и давлению насыщенного пара $p = r \cdot p_н$. Поэтому $m = r\frac{\mu p_н V}{RT}$. Следовательно, увеличение массы водяного пара при увеличении относительной влажности $\Delta m = m' - m = (r' - r)\frac{\mu p_н V}{RT} \approx 4{,}84\,\text{кг}$.

Тема 3: раздел – механика, тема – движение жидкости.

Полезно повторить материалы занятия вводного курса по теме «Закон сохранения энергии», посвященные уравнению Бернулли и уравнению непрерывности течения.

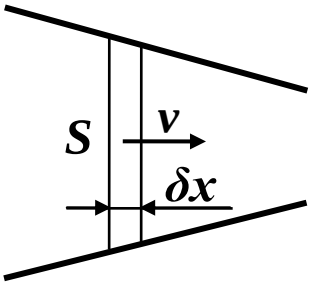
Вопрос: По трубе постоянного сечения $S = 5\text{см}^2$ к крану подается вода со скоростью $v = 2$ м/с. За какое время вода из этого крана наполнит бак емкостью $V = 60$л?

Ответ: Расход воды для данного крана $q = vS = 1$л/с. Следовательно, для заполнения бака потребуется время $t = \dfrac{V}{q} = 60$с, то есть 1 минута.

Задача: По трубе подается вода со скоростью $v = 4$ м/с. На конце этой трубы, расположенной горизонтально, надета коническая насадка, диаметр выходного отверстия которой в 2 раза меньше диаметра трубы. Давление на выходе из насадки равно нормальному атмосферному. Пренебрегая силами вязкого трения, найдите, на сколько килопаскалей давление воды на входе в насадку должно быть больше атмосферного для поддержания этого расхода воды. Ответ дайте с точностью до целого значения, без указания единиц измерения. Воду можно считать практически несжимаемой жидкостью с плотностью $\rho = 1$ г/см^3.

Решение:

У несжимаемой жидкости расход в потоке не изменяется ($q = const$), и при прохождении конической насадки скорость должна возрастать обратно пропорционально сечению. При этом увеличивается кинетическая энергия жидкости – за счет работы сил давления.



Рассмотрим движение «слоя» потока с очень малой толщиной δx и поперечным сечением S (ввиду малости толщины пренебрегаем его изменением). Масса этого слоя $\delta m = \rho S \delta x$, и увеличение его кинетической энергии при сдвиге в «соседнее» положение $\Delta E_K = \Delta\left(\dfrac{\rho S \delta x v^2}{2}\right)$. Сила, разгоняющая слой – это разность сил давления по разные стороны от слоя (ясно, что для разгона жидкости давление должно <u>убывать</u> вдоль потока, и эта разность отрицательна), поэтому $\Delta\left(\dfrac{\rho S \delta x v^2}{2}\right) = (-\Delta p) S \delta x \Rightarrow \Delta\left(\dfrac{\rho v^2}{2} + p\right) = 0$. Итак, величина $\dfrac{\rho v^2}{2} + p = const$ в горизонтальном потоке невязкой несжимаемой жидкости (этот результат также можно получить из *закона Бернулли*). На выходе из насадки давление становится равно внешнему (атмосферному), поэтому давление на входе определяется из соотношения $\dfrac{\rho v^2}{2} + p = \dfrac{\rho v'^2}{2} + p_0$. При этом $v' = \left(\dfrac{d}{d'}\right)^2 v = 4v$. Значит, избыточное давление на входе насадки $\Delta p = p - p_0 = \dfrac{\rho v'^2}{2} - \dfrac{\rho v^2}{2} = \dfrac{15}{2}\rho v^2 \approx 120$ кПа.

Тема 4: раздел – электродинамика, тема – явление электромагнитной индукции.

Полезно повторить материалы вводного занятия по теме и задания отборочного этапа по этой теме «Электромагнитная индукция».

Вопрос: По гладким вертикальным направляющим в сильном магнитном поле падают медное и деревянное кольца примерно одинаковой массы. Линии индукции поля перпендикулярны плоскости колец. Какое из колец должно падать медленнее и почему?

Ответ: В сильном поле даже небольшая неоднородность приведет к появлению в проводящем теле индукционных токов (токов Фуко). Поэтому в этом теле будет выделяться

тепло, появляющееся из-за убыли кинетической энергии (можно также сослаться на правило Ленца – индукционные явления всегда противодействуют причине, вызвавший их появление, поэтому силы Ампера, действующие на индукционные токи, будут направлены против скорости тела. Значит, проводящее кольцо (медное) будет падать медленнее непроводящего (деревянного).

Задача: Для разгона тележки массой $m = 6$ кг по двум горизонтальным прямолинейным толстым металлическим рельсам используется следующий механизм. Колеса тележки непроводящие, но между ними помещена проводящая планка, контактирующая с обоими рельсами (и изолированная от остальных частей тележки). Распределение масс в тележке таково, что сила давления планки на рельсы постоянна и равна 25% от веса тележки. Коэффициент трения между планкой и рельсами равен $\mu = 0{,}8$. К концам рельс подключают аккумулятор с ЭДС $\mathcal{E} = 92$ В, а в пространстве между ними создано вертикальное магнитное поле (направление выбрано так, чтобы тележка уезжала от аккумулятора) с индукцией $B = 5$ Тл. Длина планки $l = 0{,}8$ м, ее сопротивление (включающее сопротивление контактов) $R = 10$ Ом намного больше внутреннего сопротивления источника и сопротивления участков рельс, по которым проезжает тележка в ходе разгона. Ускорение свободного падения при выполнении данного задания считать равным $g \approx 10$ м/с^2. Сопротивлением воздуха и трением качения пренебречь. До какой максимальной возможной скорости может разогнаться тележка, если рельсы очень длинные?

Решение:

В горизонтальном направлении на тележку действуют сила трения планки о рельсы $F_{тр} = \mu N = \frac{1}{4}\mu mg$ и сила Ампера $F_A = BlI$ (действует на планку с током со стороны магнитного поля). Уравнение движения тележки $ma_x = BlI - \frac{1}{4}\mu mg$, а сила тока при движущейся тележке вычисляется с учетом ЭДС индукции $\mathcal{E}_i = -B\frac{\Delta S}{\Delta t} = -Bl\frac{\Delta x}{\Delta t} = -Bl\,v_x$ (ясно, что ЭДС индукции стремится уменьшить силу тока): $I = \frac{\mathcal{E} + \mathcal{E}_i}{R} = \frac{\mathcal{E} - Blv_x}{R}$. В процессе разгона скорость растет, а ускорение уменьшается. Максимальная скорость соответствует нулевому ускорению, и поэтому $0 = Bl\frac{\mathcal{E} - Blv_{\max}}{R} - \frac{1}{4}\mu mg \Rightarrow v_{\max} = \frac{\mathcal{E}}{Bl} - \frac{\mu mgR}{4B^2l^2} = 15{,}5$ м/с.