Олимпиада школьников «Курчатов» по физике – 2024

Заключительный этап 6 апреля 8 класс

Задача 1. Стакан с водой помещают на весы и начинают нагревать воду кипятильником. Кипятильник работает от сети с напряжением 240 В и протекающим током 8,3 А. Когда вода закипает, включают секундомер и начинают фиксировать показания весов с интервалом 10 с, занося данные в таблицу.

1. Используя результаты измерений, рассчитайте энергию, необходимую для испарения 1 кг воды при температуре $100°C$. Удельную теплоту парообразования воды в условиях задачи считать неизвестной постоянной.
2. Воду массой 0,9 кг при температуре $0°C$ нагревают, пропуская струю водяного пара при температуре $100°C$. Используя результат прошлого пункта, найдите температуру воды в момент, когда сконденсируется $m = 0{,}1$ кг воды. Удельная теплота нагревания воды $c_{\text{в}} = 4200$ Дж/(кг·$°C$).

t, с	m, г
0	168
10	159
20	151
30	142
40	133
50	124
60	116
70	107

Возможное решение

1) Построив график по табличным данным, можем найти скорость испарения воды:

$$u \approx 0{,}87 \cdot 10^{-3}\text{кг/с}.$$

Тогда искомая энергия, необходимая для испарения 1 кг воды при температуре $100°C$, может быть найдена как:

$$E = \frac{P}{u} = \frac{UI}{u} \approx 2{,}3 \text{ МДж}.$$

2) Запишем уравнение теплового баланса, чтобы найти температуру, до которой нагреется часть воды массой 0,9 кг при пропускании через нее горячего пара (для которого известна энергия, необходимая для испарения одного килограмма воды):

$$0{,}1E = 0{,}9 \cdot (t' - 0) \cdot c_{\text{в}} \quad \Rightarrow \quad t' \approx 60{,}8°C.$$

Таким образом, мы имеем смесь воды массой 0,9 кг при температуре $60{,}8°C$ и воды массой 0,1 кг при температуре $100°C$. Уравнение теплового баланса примет вид:

$$0{,}9 \cdot (t - 60{,}8) = 0{,}1 \cdot (100 - t).$$

Тогда $t = 64{,}8°C$.

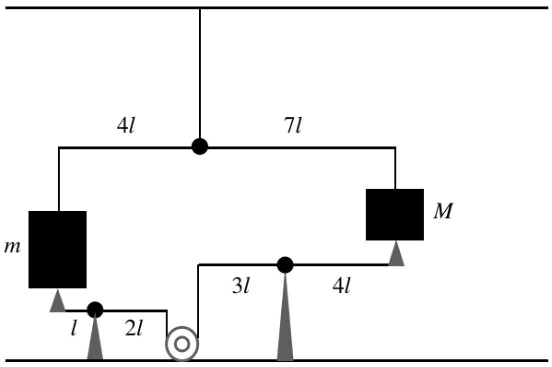
Ответ:

$$1) E = 2{,}3 \text{ МДж}, \quad 2) t = 64{,}8°C.$$

Критерии

1. Верно найдена скорость испарения воды. (+ 1 балл)
2. Получен верный численный ответ для энергии испарения килограмма воды. (+ 1 балл)
3. Верно записано уравнение теплового баланса для процесса нагревания воды с помощью пара. (+ 2 балла)
4. Получен верный численный ответ для температуры воды в момент, когда сконденсируется $m = 0{,}1$ кг воды. (+ 1 балл)

Задача 2. На рисунке приведена система рычагов. Все рычаги находятся в горизонтальном положении. Два груза массами m и M закреплены на тонких нерастяжимых невесомых нитях на плечах большого рычага и на соответствующих плечах малых рычагов, как показано на рисунке. Внутренние плечи малых рычагов связаны натянутой нерастяжимой невесомой нитью. Длины плеч всех рычагов отмечены на рисунке. Найдите отношение $\frac{m}{M}$, если известно, что сила, действующая на левое плечо большого рычага, равна половине силы тяжести, действующей на груз массы m.



Возможное решение

1) Обозначим силы, действующие на левое и правое плечи большого рычага как T_1 и T_2 соответственно. Из условия равновесия для большого рычага получаем:

$$T_1 \cdot 4l = T_2 \cdot 7l,$$

$$T_2 = \frac{4}{7}T_1.$$

По условию $T_1 = \dfrac{mg}{2}$, откуда

$$T_2 = \frac{2}{7}mg.$$

2) Запишем условия равновесия для малых рычагов, обозначив силу натяжения внутренней нити между плечами малых рычагов за T_3:

$$(mg - T_1) \cdot l = T_3 \cdot l \quad \Rightarrow \quad \frac{mg}{2} \cdot l = T_3 \cdot 2l,$$

$$(Mg - T_2) \cdot 4l = T_3 \cdot 3l \quad \Rightarrow \quad (Mg - \frac{2}{7}mg) \cdot 4l = T_3 \cdot 3l.$$

Откуда получаем:

$$\frac{1}{4}mg = \frac{4}{3}Mg - \frac{8}{21}mg,$$

$$\frac{53}{84}mg = \frac{4}{3}Mg,$$

$$\frac{m}{M} = \frac{112}{53}.$$

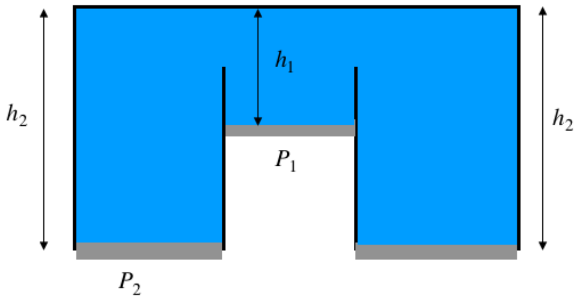
Ответ:

$$\frac{m}{M} = \frac{112}{53}.$$

Критерии

1. Верно записано условие равновесия верхнего рычага. (+1 балла)
2. Верно записаны условия равновесия нижних рычагов. (+2 балла)
3. Получено уравнение, связывающее массы m и M. (+1 балл)
4. Получен правильный численный ответ. (+1 балл)

Задача 3. Имеется герметичный сосуд, изображённый на рисунке. Снизу сосуда на жидкость давят три поршня, два из них расположены на расстоянии $h_2 = 10$ см от верхней крышки сосуда, ещё один – на высоте h_1 от верхней крышки сосуда. Давление одного из нижних поршней на жидкость составляет $P_2 = 3000$ Па, давление верхнего поршня составляет $P_1 = 2500$ Па. Найдите значение h_1. Ответ выразите в сантиметрах. Плотность жидкости $\rho = 1000\ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, ускорение свободного падения $g = 10\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.



Возможное решение

1) Заметим, что давления, создаваемые поршнями, расположенными на одном и том же удалении h_2 от верхней стенки сосуда, совпадают. Запишем условие равновесия для одного из нижних поршней:

$$P_2 = \rho g h_2 + P_0,$$

где P_0 – давление у верхней стенки сосуда. Выразим это давление из выражения, записанного ранее:

$$P_0 = P_2 - \rho g h_2.$$

2) Для поршня, расположенного на высоте h_1 от верхней крышки сосуда, аналогично запишем условие равновесия:

$$P_1 = \rho g h_1 + P_0.$$

Подставляя полученное ранее выражение для P_0, получаем

$$P_1 = \rho g h_1 + P_2 - \rho g h_2,$$

$$\rho g h_1 = P_1 - P_2 + \rho g h_2,$$

$$h_1 = \frac{P_1 - P_2}{\rho g} + h_2 = -0{,}05\ \text{м} + 0{,}1\ \text{м} = 0{,}05\ \text{м} = 5\ \text{см}.$$

Ответ:

$$h_1 = 5\ \text{см}.$$

Критерии

1. Записано давление жидкости на поршни с учетом давления жидкости на верхнюю поверхность емкости. (+2 балла)
2. Записана разность давлений жидкости на верхний и нижний поршни. (+1 балла)
3. Найдена верная формула на разницу высот верхнего и нижних поршней. (+1 балл)
4. Получен правильный численный ответ. (+1 балл)

Задача 4. Студент Миша купил в магазине неохлаждённый лимонад «Буратино» массой $m = 300$ г и температурой $T_1 = 20°\mathrm{C}$. Чтобы охладить его до температуры $T_2 = 10°\mathrm{C}$, Миша добавил восемь кубиков льда длиной ребра $a = 2$ см. Известно, что мощность передачи теплоты окружающего воздуха к смеси лимонада и льда $P = 25$ Дж/с, т.е. воздух медленно нагревает смесь.

1. Рассчитайте, как долго напиток будет оставаться охлаждённым. Ответ выразите в минутах и округлите до десятых.
2. Определите температуру напитка через 10 минут после добавления льда. Ответ выразите в °C и округлите до десятых.

Удельные теплоёмкости лимонада и воды одинаковы и равны $c = 4{,}2$ кДж/(кг·°C), удельная теплота плавления льда $\lambda = 334$ кДж/кг, плотность льда $\rho_{\text{льда}} = 900$ кг/м^3.

Возможное решение

1) Найдем количество льда, которое потребовалось для охлаждения лимонада до 10°C:

$$m_{\text{льда}} = 8 \cdot a^3 \cdot \rho_{\text{льда}} = 57{,}6\,\text{г}.$$

2) Для того, чтобы рассчитать, как долго напиток будет оставаться охлажденным, запишем уравнение теплового баланса:

$$c_{\text{лимонада}} m_{\text{лимонада}} \Delta T + Pt = \lambda m_{\text{льда}} + c_{\text{воды}} m_{\text{льда}} \Delta T,$$

$$\Delta T = 10°\mathrm{C}, \quad c_{\text{лимонада}} = c_{\text{воды}} = c \quad \Rightarrow$$

$$t = \frac{\lambda m_{\text{льда}} + c m_{\text{льда}} \Delta T - c m_{\text{лимонада}} \Delta T}{P} = 6{,}0\,\text{мин}.$$

3) Из условия задачи и посчитанного времени можно сделать вывод, что через время $t = 6$ мин напиток будет состоять из 300 г лимонада и 57,6 г расстаявшей воды, и смесь будет иметь температуру 10°C. После напиток будет нагреваться за счет взаимодействия с воздухом. Запишем соответствующее уравнение теплового баланса:

$$c_{\text{лимонада}} \cdot m_{\text{лимонада}} \cdot \Delta T' + c_{\text{воды}} \cdot m_{\text{воды}} \cdot \Delta T' = P \cdot \Delta t,$$

где $\Delta T' = T_{\text{конечная}} - T_2$, Δt — промежуток времени, оставшийся после плавления льда до достижения конечного времени, т.е. $\Delta t = 10\,\text{мин} - 6\,\text{мин} = 4\,\text{мин}$;

$$\Delta T' = 4{,}0°\mathrm{C} \quad \Rightarrow \quad T_{\text{конечная}} = \Delta T' + T_2 = 4°\mathrm{C} + 10°\mathrm{C} = 14{,}0°\mathrm{C}.$$

Ответ:

$$1)\ t = 6{,}0\,\text{мин}; \quad 2)\ T_{\text{конечная}} = 14{,}0°\mathrm{C}.$$

Критерии

1. Верно записано уравнение теплового баланса с учетом теплообмена с воздухом. (+2 балла)
2. Верно записано уравнение теплового баланса для смеси лимонада и растаявшего льда при взаимодействии с воздухом. (+2 балла)
3. Получены верные численные ответы. (+1 балл)

Задача 5. С целью тестирования на устойчивость в куб массой $M = 300$ г и длиной ребра $a = 12$ см наливают воду со скоростью $u = 6{,}4$ г/с. Определите момент времени, когда центр масс куба с набранной в него водой окажется ниже всего, если куб фиксирован в пространстве и не двигается. Плотность воды $\rho = 1000$ кг/м^3. Ширину стенки куба не учитывать.

Возможное решение

1) Обозначим массу набранной в куб воды за m, высоту водяного столба в кубе h и высоту центра масс системы l в произвольный момент времени.

Проведем некоторые рассуждения о системе. Поскольку куб симметричен, его собственный центр масс находится на высоте $\frac{a}{2}$. Центр масс набранной воды расположен в центре водной массы, то есть на высоте $\frac{h}{2}$. Если куб пуст, то центр масс системы совпадает с центром масс куба, то есть $l = \frac{a}{2}$, и высота водяного столба при этом $h = 0$.

Если теперь вода медленно поступает на дно полого куба, то высота водяного столба h начинает расти, а высота l центра масс системы начинает уменьшаться, потому что вся добавленная вода до некоторого момента будет находиться ниже центра масс системы.

2) Высота центра масс системы больше не может быть уменьшена путем добавления воды, если она совпадает с высотой водяного столба h, т.к. в этой ситуации вновь добавленное количество воды окажется выше центра масс системы, и высота центра масс системы вырастет. Следовательно, центр масс находится как можно ниже в ситуации, когда высота центра масс системы совпадает с высотой водяного столба, то есть при $l = h$. Применяя правило моментов, получаем:

$$M\left(\frac{a}{2} - l\right) = m\left(l - \frac{h}{2}\right).$$

Зная, что $l = h$, и вычислив массу набранной воды как $m = \rho a^2 h$, можно преобразовать предыдущее уравнение к квадратному уравнению относительно h:

$$\rho a^2 h^2 + 2Mh - Ma = 0.$$

Решим квадратное уравнение, отбрасив заведомо отрицательный корень, и получаем выражение для h, при котором центр масс куба с набранной в него водой окажется ниже всего:

$$h = \frac{M\left(\sqrt{1 + \frac{\rho a^3}{M}} - 1\right)}{\rho a^2}.$$

3) Тогда искомый момент времени t, в который достигается такая высота h, будет равен

$$t = \frac{m}{u} = \frac{\rho a^2 h}{u} = \frac{M}{u}\left(\sqrt{1 + \frac{\rho a^3}{M}} - 1\right) = 75 \text{ с}.$$

Ответ:

$$t = 75 \text{ с}.$$

Критерии

1. Верно определена высота центра масс куба $l = h$ в искомый момент времени. (+ 1 балл)
2. Верно применено правило моментов для куба с жидкостью. (+ 1 балл)
3. Получено выражение для высоты центра масс. (+ 1 балл)
4. Получено выражение для искомого момента времени. (+ 1 балл)
5. Получен верный численный ответ. (+ 1 балл)