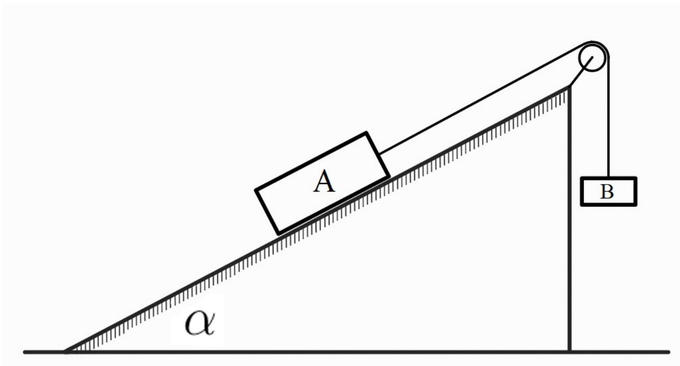
ВСЕРОССИЙСКАЯ ОЛИМПИАДА ШКОЛЬНИКОВ
ФИЗИКА. 2025–2026 уч. г.
ШКОЛЬНЫЙ ЭТАП. 11 КЛАСС
КРИТЕРИИ И РЕШЕНИЯ

Два тела на наклонной плоскости (10 баллов)

На наклонной плоскости, образующей угол $\alpha = 25°$ с горизонтом, покоится брусок A массой $m_A = 1{,}8$ кг. К бруску прикреплена лёгкая нерастяжимая нить, перекинутая через невесомый идеальный блок, закреплённый на вершине плоскости. На другом конце нити подвешен груз B массой $m_B = 2{,}3$ кг. Коэффициент трения скольжения между бруском A и плоскостью равен $\mu = 0{,}15$. Систему отпускают из состояния покоя (см. рисунок). Ускорение свободного падения примите равным $g = 10$ м/с^2.



1. Определите величину ускорения, с которым движется груз B. Ответ выразите в м/с^2, округлив до сотых долей. (3 балла)

2. Найдите силу натяжения нити. Ответ выразите в ньютонах, округлив до десятых долей. (2 балла)

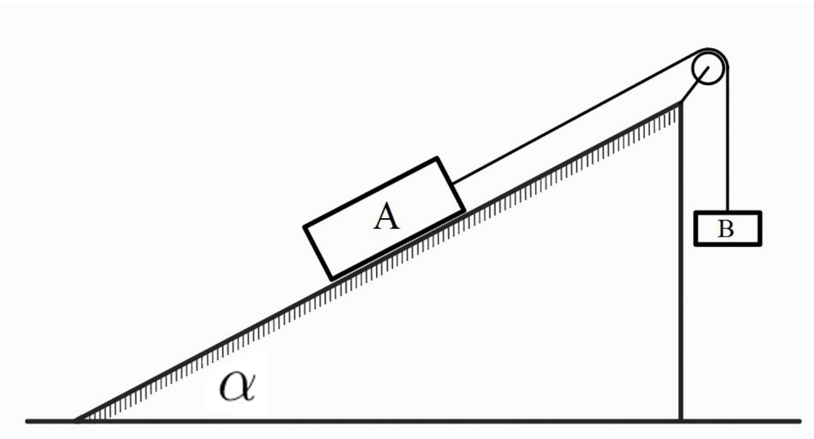
3. Какой путь пройдёт груз B за первые $t = 0{,}80$ с движения? Ответ выразите в метрах, округлив до сотых долей. (2 балла)

4. Определите минимальный коэффициент трения $\mu_{\min}$ между бруском A и плоскостью, при котором система сохранила бы состояние покоя. Ответ округлите до сотых долей. (3 балла)

Ответы: 1) 3,16 м/с^2; 2) 15,7 Н; 3) 1,01 м; 4) 0,94.

Два тела на наклонной плоскости (10 баллов)

На наклонной плоскости, образующей угол $\alpha = 35^\circ$ с горизонтом, может скользить брусок A массы $m_A = 2{,}4$ кг. У вершины плоскости закреплён невесомый идеальный блок. К бруску прикреплена лёгкая нерастяжимая нить, перекинутая через блок; на другом конце нити подвешен груз B массы $m_B = 3{,}0$ кг. Коэффициент трения скольжения между бруском A и плоскостью равен $\mu = 0{,}22$. Систему отпускают из состояния покоя (см. рисунок). Ускорение свободного падения примите равным $g = 10\,\text{м/с}^2$.



1. Определите величину ускорения, с которым движется груз B. Ответ выразите в м/с^2, округлив до десятых долей. (3 балла)

2. Найдите силу натяжения нити. Ответ выразите в ньютонах, округлив до десятых долей. (2 балла)

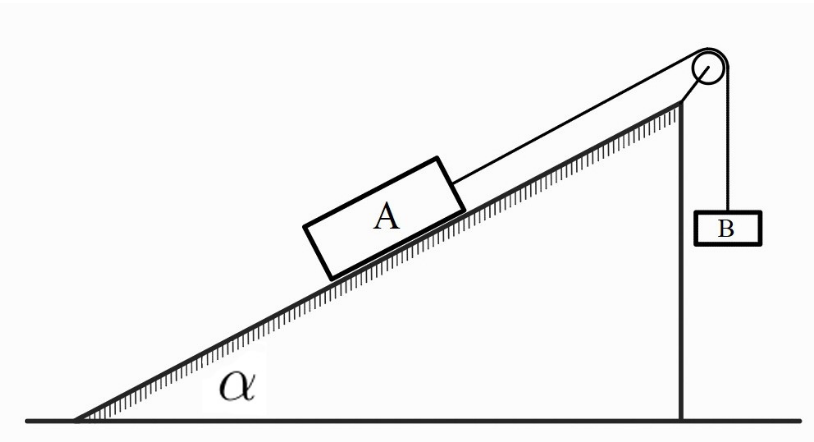
3. Какой станет скорость груза B, когда он опустится на $s = 1{,}20$ м? Ответ выразите в м/с, округлив до сотых долей. (3 балла)

4. Определите модуль работы силы трения, совершённой над бруском A при его перемещении на $s = 1{,}20$ м вдоль плоскости. Ответ укажите в джоулях, округлив до сотых долей. (2 балла)

Ответы: 1) $2{,}2\,\text{м/с}^2$; 2) 23,4 Н; 3) 2,30 м/с; 4) 5,19 Дж.

Два тела на наклонной плоскости (10 баллов)

На наклонной плоскости, образующей угол $\alpha = 32^\circ$ с горизонтом, покоится брусок A массы $m_A = 3{,}0$ кг. К бруску прикреплена лёгкая нерастяжимая нить, перекинутая через невесомый идеальный блок, закреплённый у вершины плоскости. На другом конце нити подвешен груз B массы $m_B = 4{,}2$ кг. Коэффициент трения скольжения между бруском A и плоскостью равен $\mu = 0{,}18$. Систему отпускают из состояния покоя (см. рисунок). Ускорение свободного падения примите равным $g = 10$ м/с^2.



1. Определите величину ускорения, с которым движется груз B. Ответ выразите в м/с^2, округлив до сотых долей. (3 балла)

2. Найдите силу натяжения нити. Ответ выразите в ньютонах, округлив до десятых долей. (2 балла)

3. Какова будет суммарная кинетическая энергия двух тел в тот момент, когда груз B опустится на $s = 1{,}40$ м относительно начального положения? Ответ выразите в джоулях, округлив до десятых долей. (3 балла)

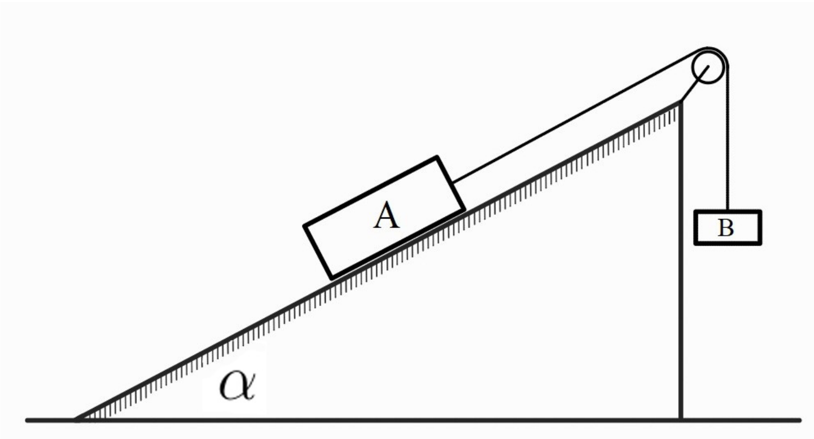
4. Рассчитайте модуль мгновенной мощности силы натяжения нити, действующей на груз B, в момент, когда груз B прошёл указанный путь $s = 1{,}40$ м. Ответ выразите в ваттах, округлив до десятых долей. (2 балла)

Ответы: 1) 2,99 м/с^2; 2) 29,4 Н; 3) 30,1 Дж; 4) 85,2 Вт.

Два тела на наклонной плоскости (10 баллов)

На наклонной плоскости, образующей неизвестный угол α с горизонтом, покоится брусок A массы $m_A = 3{,}1$ кг. К нему привязана лёгкая нерастяжимая нить, перекинутая через невесомый идеальный блок, закреплённый у вершины плоскости. На другом конце нити подвешен груз B массы $m_B = 3{,}8$ кг. Коэффициент трения скольжения между бруском A и плоскостью равен $\mu = 0{,}20$.

Экспериментально установлено, что после отпускания системы из состояния покоя груз B движется вниз с постоянным ускорением $a = 2{,}20\,\text{м/с}^2$. Ускорение свободного падения примите равным $g = 10\,\text{м/с}^2$ (см. рисунок).



1. Определите угол наклона плоскости α. Ответ дайте в градусах, округлив до десятых долей. (3 балла)

2. Рассчитайте силу натяжения нити. Ответ дайте в ньютонах, округлив до десятых долей. (2 балла)

3. На какое расстояние опустится груз B за первые $t = 1{,}10$ с движения? Ответ дайте в метрах, округлив до сотых долей. (3 балла)

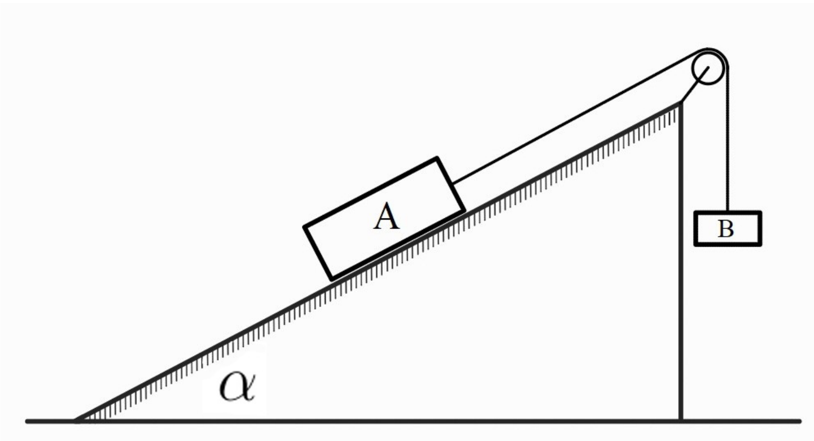
4. Определите модуль работы силы трения, совершённой над бруском A за время, указанное в пункте 3. Ответ укажите в джоулях, округлив до сотых долей. (2 балла)

Ответы: 1) $34{,}9°$; 2) 29,6 Н; 3) 1,33 м; 4) 6,77 Дж.

Два тела на наклонной плоскости (10 баллов)

На наклонной плоскости, образующей угол $\alpha = 26^\circ$ с горизонтом, покоится брусок A массы $m_A = 2{,}8\,$кг. К бруску привязана лёгкая нерастяжимая нить, перекинутая через невесомый идеальный блок, закреплённый у вершины плоскости. На другом конце нити подвешен груз B неизвестной массы m_B. Коэффициент трения скольжения между бруском A и плоскостью равен $\mu = 0{,}17$.

В эксперименте установлено, что после отпускания системы из состояния покоя ускорение груза B остаётся постоянным и равно $a = 1{,}95\,\text{м/с}^2$ (груз B движется вниз). Ускорение свободного падения примите равным $g = 10\,\text{м/с}^2$ (см. рисунок).



1. Определите массу груза m_B. Ответ дайте в килограммах, округлив до сотых долей. (3 балла)

2. Найдите силу натяжения нити. Ответ дайте в ньютонах, округлив до десятых долей. (2 балла)

3. Какой станет скорость груза B, когда он опустится на $s = 1{,}30\,$м? Ответ дайте в м/с, округлив до сотых долей. (3 балла)

4. Определите модуль работы силы трения, совершённой над бруском A при его перемещении на $s = 1{,}30\,$м вдоль плоскости. Ответ укажите в джоулях, округлив до сотых долей. (2 балла)

Ответы: 1) 2,73 кг; 2) 22,0 Н; 3) 2,25 м/с; 4) 5,56 Дж.

Типовое решение для сюжета «Два тела на наклонной плоскости»

Уникальные вопросы, которые встречаются в данных задачах

1. Ускорение бруска или груза a.
2. Сила натяжения нити T.
3. Кинематика при постоянном a: путь за время t, скорость/энергия после смещения на s.
4. Работа силы трения над бруском A, реакция опоры N, мгновенная мощность $P = Tv$.
5. «Порог покоя»: минимальный коэффициент трения $\mu_{\min}$ для равновесия системы.
6. «Обратные» задачи: найти α, μ или m_B по известному a.

Модель и обозначения

Брусок A массой m_A на плоскости под углом α к горизонту; подвес B массой m_B через невесомый блок и невесомую нерастяжимую нить. Трение скольжения между A и плоскостью с коэффициентом μ. Ускорение свободного падения g. После отпускания из покоя брусок/груз движутся с постоянным по модулю ускорением.

Направление оси вдоль возможного перемещения выбираем так, чтобы для груза B направление «вниз» было положительным. Тогда брусок A движется «вверх по плоскости», а сила трения на A направлена «вниз по плоскости».

Базовые уравнения (в проекциях)

Для А (направление вверх по плоскости):

$$T - m_A g \sin\alpha - \mu m_A g \cos\alpha = m_A a. \tag{1}$$

Для B (направление вниз):

$$m_B g - T = m_B a. \tag{2}$$

Складывая (1) и (2), получаем ускорение при движении B вниз:

$$a = g\,\frac{m_B - m_A\bigl(\sin\alpha + \mu\cos\alpha\bigr)}{m_A + m_B}\,.$$

Сила натяжения удобнее всего выражается из (2):

$$T = m_B\,(g - a)\,.$$

Кинематика, энергия, мощность

При старте из покоя и постоянном a имеем

$$s = \tfrac{1}{2}at^2, \qquad v = at, \qquad v^2 = 2as.$$

Суммарная кинетическая энергия в любой момент (скорости тел равны по модулю):

$$K = \tfrac{1}{2}\,(m_A + m_B)\,v^2.$$

Модуль работы силы трения на пути s вдоль плоскости:

$$|A_{\text{тр}}| = \mu\, m_A g\cos\alpha\ \cdot s\,.$$

Модуль мгновенной мощности натяжения (на груз B):

$$|P| = T\,v.$$

Порог покоя (минимальный коэффициент трения)

Прежде чем считать ускорение, надо ответить на вопрос, придет ли система в движение. Если сила тяги не превосходит того, что может компенсировать трение покоя, возникающее у бруска, система может остаться в покое. Это и есть порог покоя.

1) Что сравниваем. Вдоль нити/плоскости сравниваем «несбалансированную» силу без трения и предельное значение, которое способно удержать брусок силами трения покоя:

$$\underbrace{\left| m_B g - m_A g \sin\alpha \right|}_{\text{кто «перетягивает» без трения}} \quad \le \quad \underbrace{\mu\, m_A g \cos\alpha}_{\text{максимум трения покоя}} \quad .$$

2) Формула для граничного значения. Из неравенства сразу получаем единственное пороговое значение:

$$\mu_{\min} = \frac{\left| \frac{m_B}{m_A} - \sin\alpha \right|}{\cos\alpha} \ .$$

Если $\mu_s \ge \mu_{\min}$, то система может покоиться (силы уравновешиваются статическим трением нужного направления). Если $\mu_s < \mu_{\min}$, то покой невозможен — начнётся движение.

Сила трения всегда направлена против возможного движения:

- если $\frac{m_B}{m_A} > \sin\alpha$ (перевес у подвеса), без трения груз B пошёл бы вниз; трение на бруске направлено вниз по плоскости (тормозит этот срыв);
- если $\frac{m_B}{m_A} < \sin\alpha$, без трения брусок покатился бы вниз по плоскости; трение направлено вверх по плоскости.

Обратные задачи (по измеренному ускорению)

1) Неизвестная масса груза m_B при заданных a, α, μ:

$$m_B = m_A \, \frac{g\big(\sin\alpha + \mu\cos\alpha\big) + a}{g - a}.$$

2) Неизвестный коэффициент трения μ:

$$\mu = \frac{m_B - \dfrac{a}{g}(m_A + m_B) - m_A \sin\alpha}{m_A \cos\alpha}.$$

3) Неизвестный угол α: Из формулы на a получаем

$$\sin\alpha + \mu\cos\alpha = \frac{m_B g - (m_A + m_B)a}{m_A g} =: C.$$

Запишем $\sin\alpha + \mu\cos\alpha = \sqrt{1+\mu^2}\,\sin(\alpha+\varphi)$, где $\varphi = \operatorname{arctg}\mu$. Тогда

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{C}{\sqrt{1+\mu^2}}\right) - \varphi$$

с учётом условия $\alpha \in (0^\circ, 90^\circ)$.

Неупругий удар (10 баллов)

На гладком горизонтальном столе покоятся два бруска: левый массой $m_2 = 0{,}30$ кг, правый массой $m_3 = 0{,}50$ кг. Бруски соединены идеальной пружиной жёсткостью $k = 200$ Н/м.

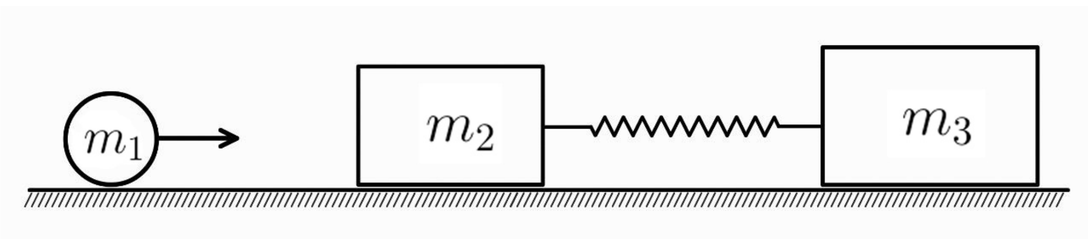
Слева по столу без трения скользит снаряд массой $m_1 = 0{,}20$ кг со скоростью $v_0 = 4{,}0$ м/с и центральным абсолютно неупругим образом сталкивается с левым бруском. После удара система «снаряд + левый брусок» движется как единое целое.

5. Определите скорость u системы «снаряд + левый брусок» сразу после удара. Ответ выразите в м/с, округлив до десятых долей. (2 балла)

6. Определите скорость правого бруска m_3 в момент максимального сжатия пружины. Ответ выразите в м/с, округлив до десятых долей. (2 балла)

7. Найдите максимальное сжатие пружины $x_{\max}$. Ответ выразите в см, округлив до десятых долей. (3 балла)

8. На сколько процентов уменьшилась механическая энергия системы при соударении? Дайте ответ в процентах, округлив до целого числа. (3 балла)



Ответы: 5) 1,6 м/с; 6) 0,8 м/с; 7) 5,7 см; 8) 60%.

Неупругий удар (10 баллов)

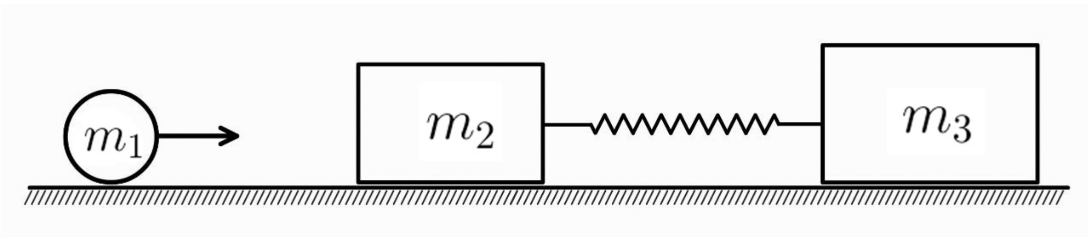
На гладком горизонтальном столе покоятся два бруска: левый массой $m_2 = 0{,}30$ кг, правый массой m_3 (неизвестна). Бруски соединены идеальной пружиной жёсткостью $k = 200$ Н/м. Слева движется снаряд массой $m_1 = 0{,}20$ кг, который центральным абсолютно неупругим образом сталкивается с левым бруском; далее оба тела движутся как единое целое.

5. Скорость объединившихся тел массами m_1 и m_2 после удара оказалась равной $u = 2{,}0$ м/с. Определите начальную скорость v_0 снаряда. Ответ выразите в м/с, округлив до десятых долей. (2 балла)

6. При максимальном сжатии пружины её деформация равна $x_{\max} = 4{,}00$ см. Найдите массу правого бруска m_3. Ответ выразите в кг, округлив до сотых долей. (3 балла)

7. Определите скорость правого бруска m_3 в момент максимального сжатия пружины. Ответ выразите в м/с, округлив до десятых долей. (2 балла)

8. Какая доля кинетической энергии системы «снаряд + левый брусок» сразу после удара перешла в потенциальную энергию пружины к моменту её максимального сжатия? Ответ дайте в процентах, округлив до целого числа. (3 балла)



Ответы: 5) 5,0 м/с; 6) 0,10 кг; 7) 1,7 м/с; 8) 16%.

Неупругий удар (10 баллов)

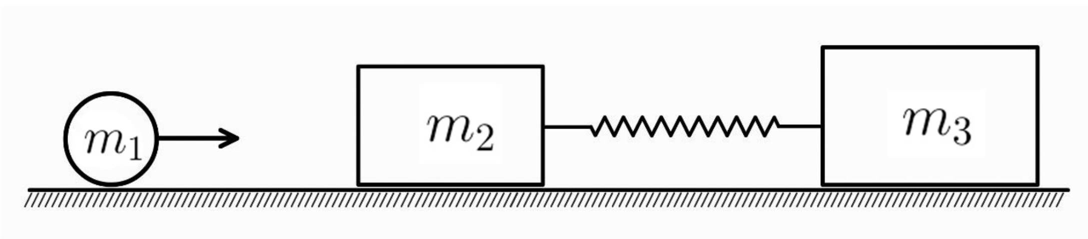
На гладкой горизонтальной поверхности покоятся два бруска: левый массой $m_2 = 0{,}25$ кг, правый массой $m_3 = 0{,}55$ кг. Они соединены идеальной пружиной жёсткостью $k = 180$ Н/м. Слева движется снаряд массой $m_1 = 0{,}20$ кг со скоростью $v_0 = 3{,}5$ м/с, который центральным абсолютно неупругим образом сталкивается с левым бруском; после удара тела снаряд и левый брусок движутся как единое целое.

5. Определите скорость u системы «снаряд+левый брусок» сразу после удара. Ответ выразите в м/с, округлив до десятых долей. (2 балла)

6. В некоторый момент скорость системы m_1+m_2 равнялась 1,0 м/с. Найдите скорость правого бруска в этот момент. Ответ выразите в м/с, округлив до сотых долей. (3 балла)

7. Определите скорость снаряда в момент максимального сжатия пружины. Ответ выразите в м/с, округлив до десятых долей. (2 балла)

8. Определите максимальное сжатие пружины $x_{\max}$ после удара. Ответ выразите в сантиметрах, округлив до десятых долей. (3 балла)



Ответы: 5) 1,6 м/с; 6) 0,45 м/с; 7) 0,7 м/с; 8) 5,8 см.

Неупругий удар (10 баллов)

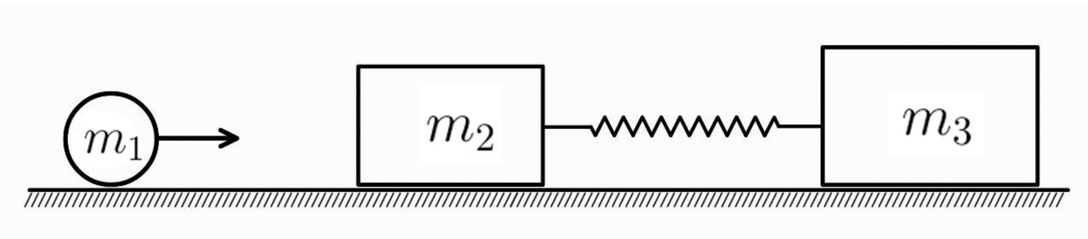
На гладком горизонтальном столе покоятся два бруска: левый массой $m_2 = 0{,}40$ кг и правый массой m_3 (неизвестна). Бруски соединены идеальной пружиной жёсткостью $k = 250$ Н/м. Слева по столу движется снаряд массой $m_1 = 0{,}25$ кг, который центрально абсолютно неупруго сталкивается с левым бруском. Максимальное сжатие пружины при дальнейшем движении оказалось равным $x_{\max} = 7{,}0$ см.

5. После столкновения снаряд и левый брусок стали двигаться со скоростью $u = 2{,}5$ м/с. Определите скорость v_0 снаряда до удара. Ответ выразите в м/с, округлив до десятых долей. (2 балла)

6. Найдите массу правого бруска m_3. Ответ выразите в кг, округлив до сотых долей. (3 балла)

7. Определите скорость правого бруска V в момент максимального сжатия пружины. Ответ выразите в м/с, округлив до десятых долей. (3 балла)

8. Какая доля кинетической энергии системы «снаряд + левый брусок» сразу после удара перешла в потенциальную энергию пружины к моменту её максимального сжатия? Ответ выразите в процентах, округлив до целого числа. (2 балла)



Ответы: 5) 6,5 м/с; 6) 0,28 кг; 7) 1,7 м/с; 8) 30%.

Неупругий удар (10 баллов)

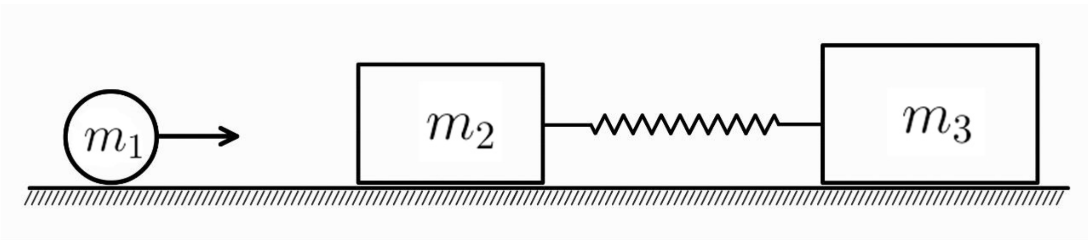
На гладком горизонтальном столе покоятся два бруска: левый массой $m_2 = 0{,}45$ кг, правый массой $m_3 = 0{,}55$ кг. Бруски соединены идеальной пружиной жёсткостью $k = 160$ Н/м. Слева к левому бруску движется снаряд массой $m_1 = 0{,}30$ кг со скоростью $v_0 = 4{,}5$ м/с, который центрально абсолютно неупруго сталкивается с ним.

5. Какая доля начальной кинетической энергии снаряда стала кинетической энергией системы «снаряд + левый брусок» сразу после удара? Ответ выразите в процентах, округлив до целого числа. (2 балла)

6. Определите скорость правого бруска в момент максимального сжатия пружины. Ответ выразите в м/с, округлив до десятых долей. (3 балла)

7. В некоторый момент скорость правого бруска составляла $V_3 = 0{,}7$ м/с. Определите скорость системы «снаряд + левый брусок» в тот же момент. Ответ выразите в м/с, округлив до десятых долей. (3 балла)

8. Определите максимальное сжатие пружины $x_{\max}$ после удара. Ответ выразите в сантиметрах, округлив до десятых долей. (2 балла)



Ответы: 5) 40%; 6) 1,0 м/с; 7) 1,3 м/с; 8) 8,0 см.

Типовое решение для сюжета «Неупругий удар»

Уникальные вопросы, встречающиеся в данных задачах

1. Скорость объединённого левого тела сразу после удара u.
2. Скорость правого бруска в различные моменты (в том числе при максимальном сжатии).
3. Максимальное сжатие пружины $x_{\max}$.
4. Доли/потери механической энергии на каждом этапе.
5. Обратные задачи: определение m_3 или v_0 по измеренным u, $x_{\max}$, V и т. п.

Модель и этапы

Стол гладкий, пружина идеальная. Слева летит снаряд массой m_1 со скоростью v_0. Левый брусок имеет массуm_2, правый — массу m_3; между ними имеется пружина жёсткости k. Удар абсолютно неупругий: снаряд слипается с левым бруском.

- **Этап 1 (удар)**: полный импульс системы сохраняется.
- **Этап 2 (после удара → максимум сжатия)**: по горизонтали внешние силы не действуют ⇒ полный импульс сохраняется ; трения нет ⇒ механическая энергия также сохраняется.
- В момент $x_{\max}$ все три тела движутся с одной и той же скоростью V

Обозначим $m_L = m_1 + m_2$, $M = m_1 + m_2 + m_3 = m_L + m_3$.

1) Удар (сохранение импульса):

$$m_1 v_0 = m_L u \quad \Rightarrow \quad u = \frac{m_1}{m_1 + m_2}\, v_0\,.$$

2) После удара в любой момент:

$$m_L v_L + m_3 v_R = m_1 v_0 = m_L u \quad \text{(сохранение импульса)}.$$

$$\tfrac{1}{2} m_L v_L^2 + \tfrac{1}{2} m_3 v_R^2 + \tfrac{1}{2} k x^2 = \tfrac{1}{2} m_L u^2 \quad \text{(сохранение энергии)}.$$

3) В момент максимального сжатия $x_{\max}$ (при общей скорости V):

$$m_L u = MV \;\Rightarrow\; V = \frac{m_1}{M}\, v_0 = \frac{m_L}{M}\, u\,;$$

$$\tfrac{1}{2} m_L u^2 = \tfrac{1}{2} M V^2 + \tfrac{1}{2} k x_{\max}^2 \;\Rightarrow\; x_{\max} = u \sqrt{\frac{m_L m_3}{k\, M}} = \; v_0\, \frac{m_1}{\sqrt{k}} \, \sqrt{\frac{m_3}{m_L\, M}}\,.$$

Энергетические доли

- **Потеря энергии на ударе** (снаряд $\to$ «снаряд+левый брусок»):

$$\eta_{\text{пот}} = 1 - \frac{K_{\text{после}}}{K_{\text{до}}} = 1 - \frac{m_1}{m_1 + m_2} = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \quad \text{(в долях)}.$$

- **Доля $K_{\textbf{после}}$, перешедшая в пружину к** $x_{\max}$:

$$\frac{E_{\text{пруж, max}}}{K_{\text{сразу}}} = \frac{\frac{1}{2} k x_{\max}^2}{\frac{1}{2} m_L u^2} = \frac{m_3}{M}.$$

Ответы на некоторые задаваемые вопросы

скорость u сразу после удара : $u = \dfrac{m_1}{m_1 + m_2} v_0.$

Скорость правого бруска при $x_{\max}$: скорости равны $V = \dfrac{m_1}{M} v_0 = \dfrac{m_L}{M} u.$

Максимальное сжатие: $x_{\max} = u\sqrt{\dfrac{m_L m_3}{k\,M}}$. Если даны v_0 и массы, можно подставить $u = \dfrac{m_1 v_0}{m_L}$.

«Промежуточный момент»: известна одна скорость . Всегда верно равенство $m_L v_L + m_3 v_R = m_L u$, следовательно

$$v_R = \frac{m_L(u - v_L)}{m_3}, \qquad v_L = u - \frac{m_3}{m_L} v_R\,.$$

Если нужно найти ещё и x в этот момент, пишем закон сохранения энергии:

$$x = \sqrt{\frac{m_L(u^2 - v_L^2) - m_3 v_R^2}{k}}.$$

Решения обратных задач

- По u и $x_{\max}$ находим m_3:

$$m_3 = \frac{m_L^2 u^2}{m_L u^2 - k x_{\max}^2} - m_L\,.$$

- По u находим v_0: $v_0 = \dfrac{m_1 + m_2}{m_1}\,u\,.$
- По V при $x_{\max}$ — $v_0 = \dfrac{M}{m_1} V\,.$

Цикл с линейным участком (10 баллов)

С одним молем идеального одноатомного газа совершают циклический процесс $ABCDA$, состоящий из двух изохорных процессов AB и CD, изобарного процесса DA и процесса BC, в котором давление остаётся пропорциональным объёму ($P = kV$). Объём газа в процессе AB равен 9 л, в процессе CD — 21 л, давление в процессе DA равно 30 кПа. Максимальное давление газа в цикле равно 210 кПа. Во всех расчётах используйте универсальную газовую постоянную $R = 8{,}314$ Дж/(моль·К).

9. Рассчитайте работу, совершённую газом на участке $B \to C$. Ответ выразите в кДж, округлив до сотых долей. (3 балла)

10. Найдите количество теплоты, отданное газом на участке $C \to D$. Ответ выразите в кДж, округлив до сотых долей. (3 балла)

11. Определите изменение внутренней энергии газа за полуцикл $A \to B \to C$. Ответ выразите в кДж, округлив до сотых долей. (2 балла)

12. Найдите температуру газа в состоянии C. Ответ выразите в К, округлив до целого числа. (2 балла)

Ответы: 9) 1,80 кДж; 10) 5,67 кДж 11) 6,21 кДж; 12) 530 К.

Цикл с линейным участком (10 баллов)

С одним молем идеального одноатомного газа совершают циклический процесс $ABCDA$, состоящий из изобарного процесса AB, двух изохорных процессов BC и DA и процессаCD, в котором давление остаётся пропорциональным объёму ($P = kV$). Давление в процессе AB равно 40 кПа. Объём газа в изохорных процессах BC и DA равен соответственно 24 л и 12 л. Максимальное давление газа в цикле равно 180 кПа. Во всех расчётах используйте универсальную газовую постоянную $R = 8{,}314$ Дж/(моль·К).

9. Найдите работу, совершённую над газом за цикл. Ответ выразите в кДж, округлив до сотых долей. (3 балла)

10. Найдите количество теплоты, полученное газом на участке $A \to B$. Ответ выразите в кДж, округлив до сотых долей. (3 балла)

11. Определите изменение внутренней энергии на участке $C \to D \to A$. Ответ выразите в кДж, округлив до сотых долей. (2 балла)

12. Найдите температуру газа в состоянии D. Ответ выразите в К, округлив до целого числа. (2 балла)

Ответы: 9) 1,14 кДж; 10) 1,20 кДж; 11) -5,76 кДж; 12) 130 К.

Цикл с линейным участком (10 баллов)

С одним молем идеального одноатомного газа совершают циклический процесс $ABCDA$, состоящий из двух изохорных процессов AB и CD, изобарного процесса DA и процесса BC, в котором давление остаётся пропорциональным объёму ($P = kV$). Объёмы газа в изохорных процессах составляет: $V_A = V_B = 10$ л и $V_C = V_D = 22$ л; давление в изобарном процессе DA равно $P_A = P_D = 90$ кПа. Во всех расчётах используйте универсальную газовую постоянную $R = 8{,}314$ Дж/(моль·К).

Экспериментально установлено, что работа газа за один цикл составляет $W_{\text{цикла}} = 1{,}80$ кДж.

9. Определите коэффициент k. Ответ выразите в кПа/л, округлив до сотых долей. (2 балла)

10. Найдите давление газа в состоянии B. Ответ выразите в кПа, округлив до целого числа. (2 балла)

11. Вычислите количество теплоты, подведённое к газу на участке $A \to B$. Ответ выразите в кДж, округлив до сотых долей. (3 балла)

12. Определите температуру газа в состоянии C. Ответ выразите в К, округлив до целого числа. (3 балла)

Ответы: 9) 15,00 кПа/л; 10) 150 кПа; 11) 0,90 кДж; 12) 873 К.

Цикл с линейным участком (10 баллов)

С одним молем идеального одноатомного газа совершают циклический процесс $ABCDA$, состоящий из двух изохорных процессов AB и CD, изобарного процесса DA и процесса BC, в котором давление остаётся пропорциональным объёму ($P = kV$). В изохорных процессах объёмы равны: $V_A = V_B = 25$ л и $V_C = V_D = 40$ л. В изобарном процессе DA давление равно $P_A = P_D = 100$ кПа. Во всех расчётах используйте универсальную газовую постоянную $R = 8{,}314$ Дж/(моль·К).

Измеренная работа газа за цикл составляет$W_{\text{цикла}} = 1{,}43$ кДж.

9. Найдите коэффициент k. Ответ выразите в кПа/л, округлив до сотых долей. (3 балла)

10. Определите давление в состоянии B. Ответ выразите в кПа, округлив до целого числа. (2 балла)

11. Рассчитайте количество теплоты Q_{AB}, подведённое на участке $A \to B$. Ответ выразите в кДж, округлив до сотых долей. (3 балла)

12. Найдите КПД цикла. Ответ выразите в %, округлив до десятых долей. (2 балла)

Ответы: 9) 6,01 кПа/л; 10) 150 кПа; 11) 1,88 кДж; 12) 10,5 %.

Цикл с линейным участком (10 баллов)

С одним молем идеального одноатомного газа совершают циклический процесс $ABCDA$, состоящий из двух изохорных процессов AB и CD, изобарного процесса DA и процесса BC, в котором давление остаётся пропорциональным объёму ($P = kV$). В изохорных процессах объёмы равны$V_A = V_B = 10$ л и $V_C = V_D = 20$ л соответственно; в изобарном процессе DA давление равно 80 кПа; на участке BC давление прямо пропорционально объему, $P = kV$, где $k = 12$ кПа/л. Во всех расчётах используйте универсальную газовую постоянную $R = 8{,}314$ Дж/(моль·К).

9. Вычислите работу, совершённую над газом на участке $D \to A$. Ответ выразите в кДж, округлив до сотых долей. (2 балла)

10. Определите отношение модуля работы на участке $D \to A$ к полной работе за цикл. Ответ выразите в %, округлив до десятых долей. (2 балла)

11. Найдите модуль суммарного количества теплоты, отданного газом на участках $C \to D \to A$. Ответ выразите в кДж, округлив до сотых долей. (3 балла)

12. Вычислите отношение максимальной к минимальной температуры газа за цикл. Ответ округлите до сотых долей. (3 балла)

Ответы: 9) 0.80 кДж; 10) 80.0 %; 11) 6.80 кДж; 12) 6.00.

Типовое решение для сюжета «Цикл с линейным участком»

Уникальные вопросы, встречающиеся в задачах

1. Определение количества теплоты (полученное, отданное, на одном или нескольких участках)
2. Определение изменения внутренней энергии
3. Определение температуры в точках цикла (либо отношение)
4. Определение давления или объема газа
5. Определение параметров линейного процесса (коэффициент k)
6. Определение работы на участке цикла или КПД цикла

Описание цикла и обозначения

Рассматривается цикл $A \to B \to C \to D \to A$: две изохоры (AB и CD), одна изобара (DA), и линейный участок BC вида $P = kV$. Обозначим объёмы изохор $V_A = V_B$ и $V_C = V_D$, а давление изобары $P_A = P_D$. На участке BC: $P_B = kV_B,\ P_C = kV_C$.

Формулы для одноатомного газа

Для $\nu = 1$ моль: $U = \frac{3}{2}RT = \frac{3}{2}PV$, а значит $\Delta U = \frac{3}{2}\Delta(PV)$.

- **Изохора** ($V = \text{const}$): $\quad W = 0, \quad Q = \Delta U = \dfrac{3}{2}\Delta(PV).$
- **Изобара** ($P = \text{const}$): $\quad W = P\,\Delta V, \quad \Delta U = \dfrac{3}{2}P\,\Delta V, \quad Q = \Delta U + W = \dfrac{5}{2}P\,\Delta V.$

- **Линейный процесс** $P = kV$. Работа в процессе равна площади под его графиком, в данном случае это трапеция:

  $$W_{BC} == \frac{k}{2}(V_C^2 - V_B^2) = \frac{P_B + P_C}{2}(V_C - V_B) = \frac{1}{2}\big(P_C V_C - P_B V_B\big).$$

  Отсюда

  $$\Delta U_{BC} = \frac{3}{2}\big(P_C V_C - P_B V_B\big), \qquad Q_{BC} = \Delta U_{BC} + W_{BC} = 2\big(P_C V_C - P_B V_B\big)$$

Работа за цикл, КПД, количества теплоты

$$W_{\text{цикла}} = W_{BC} + W_{DA} = \frac{P_B + P_C}{2}(V_C - V_B) + P_A(V_A - V_D).$$

(На изохорах AB и CD работа равна нулю.)
Поступившая теплота $Q_{\text{подв}}$ идёт на участках AB (изохорный нагрев) и BC (рост PV по линейному закону):

$$Q_{AB} = \frac{3}{2}\big(P_B V_B - P_A V_A\big), \qquad Q_{BC} = 2\big(P_C V_C - P_B V_B\big).$$

КПД:

$$\eta = \frac{W_{\text{цикла}}}{Q_{\text{подв}}} \times 100\%.$$

Температуры в вершинах

Для $\nu = 1$ моль: $T = \dfrac{PV}{R}$. Значит отношения температур — это просто отношения PV:

$$\frac{T_{\max}}{T_{\min}} = \frac{(PV)_{\max}}{(PV)_{\min}}.$$

Решения «обратных» постановок вопросов

1) По работе цикла найти k. Так как $P_B = kV_B$, $P_C = kV_C$,

$$W_{\text{цикла}} = \frac{k}{2}(V_C^2 - V_B^2) + P_A\,(V_A - V_D) \ \Rightarrow\ k = \frac{2\big(W_{\text{цикла}} - P_A(V_A - V_D)\big)}{V_C^2 - V_B^2}\,.$$

2) Давления на BC через k:

$$P_B = kV_B, \qquad P_C = kV_C.$$

Квадрат из зарядов (10 баллов)

В вакууме в вершинах A, B и C квадрата $ABCD$ со стороной $a =$ 40,0 см расположены три одинаковых точечных заряда $q = +3{,}0$ мкКл. Потенциал на бесконечности принят равным нулю. Действием силы тяжести можно пренебречь. Коэффициент в законе Кулона равен $k = 9{,}0 \cdot 10^9$ Н·м^2

13. Найдите модуль напряжённости электрического поля $|\vec{E}_O|$ в центре O квадрата. Ответ выразите в кВ/м, округлив до десятых долей. (3 балла)

14. В центр квадрата помещают точечный заряд $q_0 = +1{,}2$ мкКл. Определите модуль силы, действующей на этот заряд. Ответ выразите в Н, округлив до сотых долей. (2 балла)

15. Какой заряд q_D нужно поместить в вершину D, чтобы потенциал в центре квадрата стал равен $\varphi_O = 477$ кВ? Вклад собственного поля заряда q_0 в потенциал не учитывайте. Ответ выразите в мкКл, округлив до сотых долей. (3 балла)

16. Чему будет равна потенциальная энергия U_O взаимодействия заряда q_0 со всеми зарядами в вершинах квадрата после добавления заряда q_D? Ответ выразите в Дж, округлив до сотых долей. (2 балла)

Ответы: 13) 337,5 кВ/м; 14) 0,41 Н; 15) +5,99 мкКл; 16) 0,57 Дж.

Квадрат из зарядов (10 баллов)

В вакууме в вершинах A, B и C квадрата $ABCD$ со стороной $a =$ 35,0 см расположены три одинаковых точечных заряда $q = -2{,}5$ мкКл. Потенциал на бесконечности принят равным нулю. Действием силы тяжести можно пренебречь. Коэффициент в законе Кулона равен $k = 9{,}0 \cdot 10^9$ Н·м^2

13. Определите модуль напряжённости электрического поля $|\vec{E}_O|$ в центре O квадрата. Ответ выразите в кВ/м, округлив до десятых долей. (3 балла)

14. В центр квадрата помещают точечный заряд $q_0 = +1{,}5$ мкКл. Найдите модуль силы, действующей на этот заряд. Ответ выразите в Н, округлив до сотых долей. (3 балла)

15. Какой заряд q_D нужно поместить в вершину D, чтобы потенциальная энергия взаимодействия центрального заряда q_0 с четырьмя зарядами в вершинах квадрата стала равна нулю? Ответ выразите в мкКл, округлив до сотых долей. (2 балла)

16. Какую минимальную работу нужно будет совершить, чтобы перенести заряд q_0 из центра квадрата в середину стороны CD, после добавления заряда q_D? Ответ выразите в Дж, округлив до сотых долей. (2 балла)

Ответы: 13) 367,3 кВ/м; 14) 0,55 Н; 15) +7,50 мкКл; 16) 0,21 Дж.

Квадрат из зарядов (10 баллов)

В вакууме в вершинах A, B и C квадрата $ABCD$ со стороной $a =$ 30,0 см расположены три одинаковых точечных заряда $q = +3{,}0$ мкКл. Потенциал на бесконечности принят равным нулю. Действием силы тяжести можно пренебречь. Коэффициент в законе Кулона равен $k = 9{,}0 \cdot 10^9$ Н·м^2

13. Определите модуль напряжённости электрического поля $|\vec{E}_O|$ в центре O квадрата. Ответ выразите в кВ/м, округлив до десятых долей. (3 балла)

14. В центр квадрата помещают точечную частицу с массой $m_0 = 2$ г и зарядом $q_0 = -1{,}0$ мкКл. Какую минимальную работу нужно будет совершить, чтобы перенести частицу на бесконечность? Ответ выразите в Дж, округлив до сотых долей. (3 балла)

15. Каково будет начальное ускорение частицы, находящейся в центре квадрата, если ее отпустить? Ответ выразите в м/с^2, округлив до целого числа. (2 балла)

16. Определите модуль напряжённости электрического поля в середине стороны CD. Ответ выразите в кВ/м, округлив до десятых долей. (2 балла)

Ответы: 13) 600,0 кВ/м; 14) 0,38 Дж; 15) 300 м/с^2; 16) 1274,4 кВ/м.

Квадрат из зарядов (10 баллов)

В вакууме в вершинах A, B и D квадрата $ABCD$ со стороной $a =$ 50,0 см расположены три одинаковых точечных заряда $q = +5{,}0$ мкКл, а в вершине C — неизвестный заряд q_C. Потенциал на бесконечности принят равным нулю. Действием силы тяжести можно пренебречь. Коэффициент в законе Кулона равен $k = 9{,}0 \cdot 10^9$ Н·м^2

Известно, что модуль напряжённости поля в центре квадрата равен

$E_O = 450\,$кВ/м, а вектор напряжённости в этой точке направлен к вершине C.

13. Чему равен заряд q_C?. Ответ выразите в мкКл, округлив до сотых долей. (3 балла)

14. Найдите потенциал φ_O в центре квадрата. Ответ выразите в кВ, округлив до целого числа. (2 балла)

15. В центр квадрата помещают точечный заряд $q_0 = +2{,}0$ мкКл. Найдите модуль силы, действующей на него. Ответ выразите в Н, округлив до сотых долей. (2 балла)

16. Какую минимальную работу нужно будет совершить, чтобы перенести заряд q_0 из центра квадрата на бесконечность? Ответ выразите в Дж, округлив до сотых долей. (3 балла)

Ответы: 13) $-1{,}25$ мкКл; 14) 350 кВ; 15) 0,90 Н; 16) 0,70 Дж.

Квадрат из зарядов (10 баллов)

В вершины A, B и C квадрата $ABCD$ со стороной a помещены 3 одинаковых точечных заряда $q = +4{,}0$ мкКл. Потенциал на бесконечности принят равным нулю. Действием силы тяжести можно пренебречь. Коэффициент в законе Кулона равен $k = 9{,}0 \cdot 10^9$ Н·м^2

Известно, что модуль напряжённости электрического поля в центре квадрата O равен

$$|\vec{E}_O| = 500 \text{ кВ/м}.$$

13. Определите длину стороны квадрата a. Ответ выразите в сантиметрах, округлив до десятых долей. (3 балла)

14. В центр квадрата помещают точечный заряд $q_0 = -0{,}8$ мкКл. Найдите модуль силы, действующей на этот заряд. Ответ выразите в Н, округлив до сотых долей. (2 балла)

15. Какой заряд q_D нужно поместить в вершину D, чтобы потенциал в центре квадрата стал равен $\varphi_O = +200$ кВ? Вклад собственного поля заряда q_0 в потенциал не учитывайте. Ответ выразите в мкКл, округлив до десятых долей. (3 балла)

16. Определите модуль силы, действующей на центральный заряд, после установки q_D. Ответ выразите в Н, округлив до десятых долей. (2 балла)

Ответы: 13) 37,9 см; 14) 0,40 Н; 15) $-6{,}0$ мкКл; 16) 1,0 Н.

Типовое решение для сюжета «Квадрат из зарядов»

Уникальные вопросы, которые встречаются в данных задачах

1. Напряжённость в центре квадрата E_O.
2. Сила на центральный заряд $F = |q_0|\,E_O$ и/или его ускорение $a = \dfrac{F}{m_0}$.
3. Потенциал в центре φ_O и потенциальная энергия $U = q_0\varphi_O$.
4. Подбор заряда в четвёртой вершине q_D по заданному φ_O (или условию $U = 0$).
5. «Обратные» задачи: нахождение неизвестной стороны a по известному E_O; нахождение неизвестного углового заряда q_C по величине и направлению E_O.
6. Работа по переносу заряда: на бесконечность, в середину стороны и т. п.

Модель и геометрия

Квадрат $ABCD$ со стороной a, центр O. Расстояния:

$$r = \frac{a}{\sqrt{2}} \quad (\text{вершина} \;\to\; \text{центр}); \qquad |MC| = |MD| = \frac{a}{2}, \quad |MA| = |MB| =$$

Используем принцип суперпозиции для напряженности и потенциала электрического поля.

Базовые формулы (точечный заряд)

$$E = \frac{k|q|}{r^2}, \qquad \varphi = \frac{kq}{r}, \qquad F = |q_0|\,E, \qquad U = q_0\,\varphi, \qquad A_{\min} = |q_0|\,|\Delta\varphi|.$$

Поле и потенциал в центре при трёх одинаковых зарядах

Пусть три одинаковых заряда q расположены в соседних вершинах A, B, C (вершина D пустая). Тогда в центре

$$E_O = \frac{k|q|}{r^2} = \frac{2k|q|}{a^2} \quad \text{(вклад от } A \text{ и } C \text{ компенсируется).}$$

Направление: вектор $\vec{E}_O$ направлен от занятой одинокой вершины к пустой вершине D при $q > 0$ (и к пустой вершине при $q < 0$).

Потенциал в центре от этих трёх зарядов:

$$\varphi_O^{(3)} = \frac{3kq}{r} = \frac{3\sqrt{2}\,kq}{a}\,.$$

Добавление заряда в четвёртую вершину

Если в вершину D добавлен заряд q_D, то

$$\varphi_O = \frac{k(3q + q_D)}{r}\,, \qquad \vec{E}_O = \vec{E}_{(\text{от трёх})} + \vec{E}_{q_D}, \quad |\vec{E}_{(\text{от трёх})}| = \frac{k|q|}{r^2},$$

$$|\vec{E}_{q_D}| = \frac{k|q_D|}{r^2}.$$

По заданному φ_O находим

$$q_D = \frac{\varphi_O\, r}{k} - 3q\,.$$

По условию $U = q_0\varphi_O = 0$ в центре (собственный вклад q_0 не учитывайте), следовательно $\varphi_O = 0 \Rightarrow q_D = -3q$.

Сила, ускорение, энергия в центре

$$F = |q_0|\, E_O\,, \qquad a = \frac{F}{m_0}\,, \qquad U = q_0\, \varphi_O\,.$$

Работа переноса заряда

Минимальная работа внешних сил зависит только от разности потенциалов:

$$A_{\min} = |q_0|\,|\varphi(\text{конечный}) - \varphi(\text{начальный})|\,.$$

На бесконечность из центра: $A_{\min} = |q_0|\,|\varphi_O|$ (так как $\varphi(\infty) = 0$).

В середину стороны CD из центра (для трёх одинаковых зарядов q в вершинах A, B, C и, возможно, заряда q_D в вершине D):

$$\varphi(M) = k\left(\frac{q}{|MA|} + \frac{q}{|MB|} + \frac{q}{|MC|} + \frac{q_D}{|MD|}\right) = \frac{k}{a}\left(\frac{4q}{\sqrt{5}} + 2q + 2q_D\right),$$

$$\varphi(O) = \frac{k(3q + q_D)}{r} = \frac{\sqrt{2}\,k}{a}\,(3q{+}q_D), \qquad \Rightarrow \quad A_{\min} = |q_0|\,\big|\,\varphi(M) - \varphi(O)\,\big|\,.$$

«Обратные» задачи

1) Нахождение стороны a по известному $|\vec{E}_O|$ (три одинаковых заряда q в соседних вершинах):

$$E_O = \frac{2k|q|}{a^2} \;\Rightarrow\; a = \sqrt{\frac{2k|q|}{E_O}}\,.$$

2) Нахождение неизвестного заряд в углу q_C по величине и направлению $\vec{E}_O$ (в остальных трёх углах одинаковые $+q$). Суммарное поле от трёх равных зарядов $+q$ (в A, B, D) в центре равно по модулю

$$E_{ABD} = \frac{k|q|}{r^2}$$

и направлено к вершине C. Поле от заряда q_C имеет модуль $\frac{k|q_C|}{r^2}$ и направлено от вершины C при $q_C > 0$ и к C при $q_C < 0$. Если наблюдаемое $\vec{E}_O$ направлено к C, то вклады сонаправлены только при $q_C < 0$. По модулю получаем

$$|q_C| = \frac{(E_O - E_{ABD})\,r^2}{k}, \qquad \text{знак определяем из направления: } q_C < 0.$$

Если $\vec{E}_O$ направлено от C, то $q_C > 0$ и $|q_C| = \dfrac{(E_O + E_{ABD})\, r^2}{k}$.

3) Потенциал в центре при «трёх одинаковых зарядах + один неизвестный»:

$$\varphi_O = \frac{k(3q + q_X)}{r} \quad (\text{где } q_X \in \{q_D, q_C\}).$$

Поле в середине стороны. Расположение: одинаковые заряды q расположены в вершинах A, B, C, вершина D пустая. Ищем модуль поля в середине стороны CD; обозначим эту точку M.

Геометрические параметры:

$$|MC| = \frac{a}{2}, \qquad |MA| = |MB| = \frac{a}{2}\sqrt{5}.$$

Вклады по суперпозиции:

$$E_C = \frac{k|q|}{(a/2)^2} = \frac{4k|q|}{a^2} \quad (\text{вдоль стороны } CD),$$

$$E_A = E_B = \frac{k|q|}{|MA|^2} = \frac{4k|q|}{5a^2}.$$

Проекции E_A и E_B: горизонтальные (вдоль CD) взаимно компенсируются, вертикальные складываются и дают

$$E_{AB,\perp} = 2\, E_A\, \frac{2}{\sqrt{5}} = \frac{16k|q|}{5\sqrt{5}\, a^2}.$$

Итоговый модуль:

$$E_M = \sqrt{E_C^2 + E_{AB,\perp}^2} = \frac{k|q|}{a^2} \sqrt{16 + \frac{256}{125}} \;\approx\; 4{,}248\, \frac{k|q|}{a^2}\,.$$

Направление для $q > 0$: вдоль стороны от C к M плюс внутрь квадрата (перпендикуляр к стороне); для $q < 0$ — наоборот. Знак q меняет направление, но не модуль.

Линза и пластинка (10 баллов)

Небольшой протяженный предмет расположен вблизи главной оптической оси тонкой собирающей линзы и перпендикулярен ей. Расстояние от предмета до линзы составляет $s = 30{,}0$ см. Фокусное расстояние линзы равно $f = 12{,}0$ см. При решении задачи считайте все лучи параксиальными.

17. Найдите расстояние между изображением и линзой. Ответ выразите в сантиметрах, округлив до десятых долей. (2 балла)

18. Найдите поперечное увеличение. Ответ округлите до десятых долей. (2 балла)

19. Вплотную к линзе устанавливают плоскопараллельную стеклянную пластину толщиной $b = 3{,}0$ см с показателем преломления $n = 1{,}50$, так что пластина находится между линзой и изображением. Поверхности пластины перпендикулярны оптической оси линзы. Найдите расстояние от изображения, полученного в этой оптической системе, до линзы. Ответ выразите в сантиметрах, округлив до сотых долей. (2 балла)

20. В этой конфигурации найдите поперечное увеличение. Ответ округлите до сотых долей. (2 балла)

21. Пластину отодвигают от линзы на расстояние $d = 5{,}0$ см, оставляя её на стороне изображения (между линзой и изображением). Найдите новое расстояние между полученным в системе изображением и линзой. Ответ выразите в сантиметрах, округлив до десятых долей. (2 балла)

Ответы: 17) 20,0 см; 18) 0,67; 19) 21,0 см; 20) 0,67; 21) 21,0 см.

Линза и пластинка (10 баллов)

Небольшой протяженный предмет расположен вблизи главной оптической оси тонкой собирающей линзы и перпендикулярен ей. Расстояние от предмета до линзы составляет $s = 36{,}0$ см. Фокусное расстояние линзы равно $f = 12{,}0$ см. При решении задачи считайте все лучи параксиальными.

17. Найдите расстояние между изображением и линзой. Ответ выразите в сантиметрах, округлив до десятых долей. (2 балла)

18. Найдите поперечное увеличение. Ответ округлите до сотых долей. (2 балла)

19. Сразу перед линзой (со стороны предмета) плотно устанавливают плоскопараллельную стеклянную пластину толщиной $b = 4{,}0$ см с показателем преломления $n = 1{,}60$. Поверхности пластины перпендикулярны оптической оси линзы. Найдите расстояние между изображением, полученнымм в этой системе, и линзой. Ответ выразите в сантиметрах, округлив до десятых долей. (2 балла)

20. В этой конфигурации найдите поперечное увеличение. Ответ округлите до сотых долей. (2 балла)

21. Пластину оставляют перед линзой, но отодвигают от линзы на расстояние $d = 6{,}0$ см (предмет и линза остаются на прежних местах). Найдите новое расстояние между полученным в системе изображением и линзой. Ответ выразите в сантиметрах, округлив до десятых долей. (2 балла)

Ответы: 17) 18,0 см; 18) 0,50; 19) 18,4 см; 20) 0,53; 21) 18,4 см.

Линза и пластинка (10 баллов)

Небольшой протяженный предмет расположен вблизи главной оптической оси тонкой собирающей линзы и перпендикулярен ей. Расстояние от предмета до линзы составляет $s = 42{,}0$ см. Фокусное расстояние линзы равно $f = 14{,}0$ см. При решении задачи считайте все лучи параксиальными.

17. Найдите расстояние между изображением и линзой. Ответ выразите в сантиметрах, округлив до десятых долей. (2 балла)

18. Найдите поперечное увеличение. Ответ округлите до сотых долей. (2 балла)

19. Сразу перед линзой (со стороны предмета) вплотную устанавливают плоскопараллельную стеклянную пластину толщиной $b = 10{,}5$ см. При этом изображение предмета оказывается на расстоянии $s' = 22{,}0$ см от линзы. Поверхности пластины перпендикулярны оптической оси линзы. Определите показатель преломления материала пластины. Ответ дайте в виде десятичной дроби с округлением до сотых долей. (2 балла)

20. В этой конфигурации найдите поперечное увеличение. Ответ округлите до сотых долей. (2 балла)

21. Пластину перемещают на расстояние $d = 6{,}0$ см от линзы (предмет и линза остаются на прежних местах). Найдите новое расстояние между полученным в системе изображением и линзой. Ответ выразите в сантиметрах, округлив до десятых долей. (2 балла)

Ответы: 17) 21,0 см; 18) 0,50; 19) 1,50; 20) 0,57; 21) 22,0 см.

Линза и пластинка (10 баллов)

Небольшой протяженный предмет расположен вблизи главной оптической оси тонкой собирающей линзы и перпендикулярен ей. Расстояние от предмета до линзы составляет $s = 45{,}0\,\text{см}$. Фокусное расстояние линзы равно $f = 15{,}0\,\text{см}$. При решении задачи считайте все лучи параксиальными.

17. Найдите расстояние между изображением и линзой. Ответ выразите в сантиметрах, округлив до десятых долей. (2 балла)

18. Найдите поперечное увеличение. Ответ округлите до сотых долей. (2 балла)

19. Сразу за линзой (между линзой и изображением) плотно устанавливают плоскопараллельную стеклянную пластину толщиной $b = 3{,}5\,\text{см}$. Поверхности пластины перпендикулярны оптической оси линзы. При этом изображение, полученное в этих двух оптических элементах, оказалось на расстоянии $s' = 23{,}5\,\text{см}$ от линзы. Рассчитайте показатель преломления пластины. Ответ округлите до сотых долей. (2 балла)

20. В этой конфигурации найдите поперечное увеличение. Ответ округлите до сотых долей. (2 балла)

21. Пластину передвигают на расстояние $d = 6{,}0\,\text{см}$ от линзы (предмет и линза остаются на прежних местах). Найдите новое расстояние между полученным в системе изображением и линзой. Ответ выразите в сантиметрах, округлив до десятых долей. (2 балла)

Ответы: 17) $22{,}5\,\text{см}$; 18) $0{,}50$; 19) $1,40$; 20) $0{,}50$; 21) $21{,}5\,\text{см}$.

Линза и пластинка (10 баллов)

Небольшой протяженный предмет расположен вблизи главной оптической оси тонкой собирающей линзы и перпендикулярен ей. Расстояние от предмета до линзы составляет $s = 56{,}0$ см. Фокусное расстояние линзы равно $f = 16{,}0$ см. При решении задачи считайте все лучи параксиальными.

17. Найдите расстояние между изображением и линзой. Ответ выразите в сантиметрах, округлив до десятых долей. (2 балла)

18. Найдите поперечное увеличение. Ответ округлите до сотых долей. (2 балла)

19. Сразу за линзой (со стороны изображения) устанавливают плоскопараллельную стеклянную пластину из материала с показателем преломления $n = 1{,}52$. Поверхности пластины перпендикулярны оптической оси линзы. Четкое изображение формируется на расстоянии 25,0 см от линзы. Найдите толщину пластины. Ответ выразите в сантиметрах, округлив до десятых долей. (2 балла)

20. Найдите поперечное увеличение в этом случае. Ответ округлите до десятых долей. (2 балла)

21. Пластину перемещают на расстояние $d = 6{,}0$ см от линзы (предмет и линза остаются на прежних местах). Найдите новое расстояние между полученным в системе изображением и линзой. Ответ выразите в сантиметрах, округлив до десятых долей. (2 балла)

Ответы: 17) 22,4 см; 18) 0,40; 19) 7,6 см; 20) 0,40; 21) 25,0 см.

Типовое решение для сюжета «Линза и плоскопараллельная пластинка»

Уникальные вопросы, встречающиеся в данных задачах

1. Положение изображения s' без пластины.
2. Как меняется s' при установке пластины *за линзой* (между линзой и изображением).
3. Как меняется s' при установке пластины *перед линзой* (со стороны предмета).
4. Поперечное увеличение в любой конфигурации.
5. «Обратные» задачи: найти толщину b по заданному новому s' или по заданному Γ; найти n по известным b и сдвигу; обеспечить заданное положение изображения на экране и т. п.

Основные формулы для линзы

- Формула тонкой линзы:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'}\ .$$

- Поперечное увеличение:

$$\Gamma = \frac{s'}{s}.$$

Главный факт о плоскопараллельной пластине

При нормальном ходе лучей замена воздушного промежутка толщиной b на стекло с показателем преломления n формирует изображения действительного источника на расстоянии Δ ближе к пластинке, а изображение мнимого источника — на расстоянии Δ дальше от пластины, где

$$\Delta = b\left(1 - \frac{1}{n}\right).$$

При этом пластина не дает увеличения, а лишь двигает объект вдоль оптической оси. Смещение положения пластины относительно линзы не приводит к изменению ее влияния на изображение.

Возможные случаи

A. Пластина за линзой (между линзой и изображением). Плоскость изображения сдвигается к линзе на Δ:

$$s'_{\text{new}} = s' + \Delta\,, \qquad \Gamma_{\text{new}} = \Gamma = \frac{s'}{s}.$$

B. Пластина *перед линзой* (со стороны предмета). Линза «видит» предмет ближе на Δ:

$$s_{\text{эфф}} = s - \Delta, \qquad \frac{1}{f} = \frac{1}{s_{\text{эфф}}} + \frac{1}{s'_{\text{new}}} \implies s'_{\text{new}} = \frac{f\,s_{\text{эфф}}}{s_{\text{эфф}} - f}.$$

Поперечное увеличение:

$$\Gamma_{\text{new}} = \frac{s'_{\text{new}}}{s_{\text{эфф}}} = \frac{f}{s_{\text{эфф}} - f}.$$