

1. Диффузия (Вергунов А.)

Тонкая пробирка длиной L частично заполнена водой и расположена вертикально (открытым концом вверх) в камере большого объема. Воздух в камере поддерживается при нулевой относительной влажности и постоянном давлении p_0 . Вследствие диффузии в пробирке устанавливается линейное изменение концентрации водяного пара с высотой: вблизи поверхности воды пар оказывается насыщенным, при этом $p_n = 0,8p_0$, а у верхнего открытого конца пробирки его концентрация в 2 раза меньше. Пробирку сверху закрывают поршнем массой $m = p_0 S/g$, который может свободно перемещаться внутри пробирки. Определите, на какой высоте H (от нижнего конца пробирки) будет находиться поршень после установления равновесия. Изменением уровня жидкости в пробирке и ее начальным объемом пренебречь. Температура в камере и пробирке постоянна.

Возможное решение

По условию давление пара p_n зависит от высоты, введём парциальное давление сухого воздуха p_v , и так как на любой высоте $h < L$ суммарное давление воздуха с паром должно равняться p_0 :

$$p_0 = p_n(h) + p_v(h).$$

Так как давление пара с высотой изменяется линейно, можем найти его среднее значение:

$$p_{\text{ср}} = (p_n + 0,5p_n)/2 = 0,75p_n = 0,6p_0.$$

Тогда среднее давление сухого воздуха в пробирке:

$$p_{\text{вср}} = p_0 - 0,6p_0 = 0,4p_0.$$

После того, как пробирку закроют поршнем, парциальное давление пара становится одинаковым по всей высоте под поршнем и равным p_n .

Поршень уравнивается, когда:

$$p_{\text{внутри}} = p_0 + mg/S$$

А по условию:

$$m = \frac{p_0 S}{g} \Rightarrow \frac{mg}{S} = p_0$$

Т.е.:

$$p_{\text{внутри}} = 2p_0$$

$$2p_0 = p_n + p_{v2},$$

где p_{v2} – парциальное давление сухого воздуха в пробирке после установления равновесия.

$$p_{v2} = 2p_0 - p_n = 1,2p_0$$

Так как после закрытия поршнем количество сухого воздуха не изменяется,

$$p_{v2}H = p_{\text{вср}}L.$$

Тогда:

$$H = L/3.$$

Критерии оценивания

№	Критерий	Балл
1.	Запись исходного соотношения для давления в открытой пробирке: $p_0 = p_n(h) + p_v(h)$	1
2	Правильное определение значения парциального давления пара у верхнего конца пробирки в начальный момент	1
3	Корректное усреднение и нахождение $p_{\text{вср}}$	2
4	Указано, что после установления равновесия в закрытой пробирке пар будет насыщенным	1
5	Найдено новое давление смеси газов $p_{\text{внутри}}$ в пробирке	2

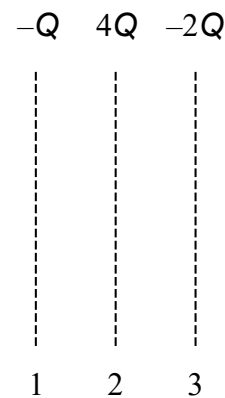
6	Найдено новое парциальное давление $p_{в2}$ сухого воздуха в пробирке	2
7	Верно найдена высота, на которой остановится поршень: $H = L/3$	1

Примечание для жюри

Полностью правильное решение, полученное неавторским методом, оценивается полным баллом. Недопустимо снижать оценку за «неправильное» оформление или неаккуратные записи.

2. Эффект Казимира (Зайцев Р.)

Три протяженные тонкие металлические сетки 1, 2 и 3, имеющие заряды $q_1 = -Q$, $q_2 = 4Q$ и $q_3 = -2Q$ ($Q > 0$) соответственно, расположены параллельно на равных расстояниях $d_{12} = d_{23} = d$ друг от друга (см. рис.). Площадь каждой из сеток равна S (расстояние $d \ll \sqrt{S}$).



- 1) Найдите модуль электрической силы, действующей на среднюю сетку со стороны двух других.
- 2) Найдите разность потенциалов между первой и второй сетками.
- 3) Если от первой сетки отделится без начальной скорости электрон, то на какое минимальное расстояние он приблизится к третьей сетке?
- 4) Найдите модуль электрической силы, действующей на среднюю сетку со стороны двух других при тех же условиях, но $d \gg \sqrt{S}$.
- 5) Получите формулу для модуля силы взаимного притяжения, действующей на единицу площади двух параллельных **незаряженных** сеток 1 и 2 (без третьей сетки) при расстоянии $d \sim 0,1$ мкм по эффекту Казимира (квантовые флуктуации вакуума), если модуль силы Казимира, действующей на единицу площади одной сетки со стороны другой, имеет вид $F/S = \alpha \cdot h^x \cdot c^y \cdot d^z$, где $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме, α – некоторая безразмерная постоянная, x , y и z – целые числа, которые вам нужно найти.

Возможное решение.

1) Согласно принципу суперпозиции, модуль напряжённости поля, созданного сетками 1 и 3 в области между ними, равен:

$$E_{13} = E_3 - E_1 = \frac{2Q - Q}{2\epsilon_0 S} = \frac{Q}{2\epsilon_0 S}.$$

Тогда, из определения напряжённости:

$$F = 4QE_{13} = \frac{2Q^2}{\epsilon_0 S}.$$

2) Согласно принципу суперпозиции, модуль напряжённости поля (от всех трех зарядов) между сетками 1 и 2 равен:

$$E_{12} = E_2 + E_1 - E_3 = \frac{3Q}{2\epsilon_0 S}.$$

Тогда разность потенциалов между первой и второй сетками:

$$U_{12} = -E_{12}d = -\frac{3Qd}{2\epsilon_0 S}.$$

Знак минус показывает, что потенциал сетки 1 меньше потенциала сетки 2.

3) Работа поля 12 по разгону электрона компенсируется работой поля 23 по остановке электрона на некотором расстоянии от третьей сетки:

$$qU_{12} = -qU_{23}.$$

Т.к. поле однородно:

$$\frac{U_{23}}{U_{23}} = \frac{l}{d} \Rightarrow l = \frac{-U_{12}}{U_{23}}d, \text{ где } l - \text{ расстояние от второй сетки до места остановки}$$

электрона.

$$U_{23} \text{ определяется аналогично } U_{12}: U_{23} = E_{23}d = \frac{5Qd}{2\epsilon_0 S}.$$

Тогда искомое расстояние:

$$x = d - l = d \left(1 + \frac{U_{12}}{U_{23}} \right) = 0,4d.$$

4) При $d \gg \sqrt{S}$ сетки можно считать точечными зарядами. Из закона Кулона и принципа суперпозиции: $F = \frac{4Q^2}{d^2 4\pi\epsilon_0}$.

5) Методом анализа размерностей составим равенство:

$$(\text{кг} \cdot \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2} \cdot \text{с})^x \cdot \left(\frac{\text{м}}{\text{с}}\right)^y \cdot \text{м}^z = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{м}^2 \text{с}^2} = \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}^2}.$$

Решая систему линейных уравнений, полученных из равенства показателей соответствующих степеней для каждой из единиц измерения (кг, м, с), получим модуль силы притяжения Казимира, действующей на единицу площади незаряженных сеток:

$$F/S = \alpha \cdot h^1 \cdot c^1 \cdot d^{-4} \quad (x = 1, y = 1, z = -4).$$

Критерии оценивания

№	Критерий	Баллы
1	Согласно принципу суперпозиции, модуль напряжённости поля, созданного сетками 1 и 3 в области между ними, равен: $E_{13} = E_3 - E_1 = \frac{2Q - Q}{2\epsilon_0 S} = \frac{Q}{2\epsilon_0 S}.$	1
2	Модуль электрической силы, действующей на среднюю сетку: $F = 4QE_{13} = \frac{2Q^2}{\epsilon_0 S}.$	1
3	Согласно принципу суперпозиции, модуль напряжённости поля (от всех трех зарядов) между сетками 1 и 2 равен: $E_{12} = E_2 + E_1 - E_3 = \frac{3Q}{2\epsilon_0 S}.$	1
4	Разность потенциалов между первой и второй сетками: $U_{12} = -E_{12}d = -\frac{3Qd}{2\epsilon_0 S}.$ Знак минус показывает, что потенциал сетки 1 меньше потенциала сетки 2.	1
5	Работа поля 12 по разгону электрона компенсируется работой поля 23 по остановке электрона на некотором расстоянии от третьей сетки: $qU_{12} = -qU_{23}.$	1
6	Минимальное расстояние электрона от третьей сетки: $x = d \left(1 + \frac{U_{12}}{U_{23}} \right) = 0,4d$	1

7	При $d \gg \sqrt{S}$: $F = \frac{4Q^2}{d^2 4\pi\epsilon_0}$	2
8	Верно составлено равенство $\left(\text{кг} \cdot \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2} \cdot \text{с}\right)^x \cdot \left(\frac{\text{м}}{\text{с}}\right)^y \cdot \text{м}^z = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{м}^2 \text{с}^2}$	1
9	Модуль силы Казимира, действующей на единицу площади незаряженных сеток: $F/S = \alpha \cdot h^1 \cdot c^1 \cdot d^{-4}$ ($x = 1, y = 1, z = -4$)	1

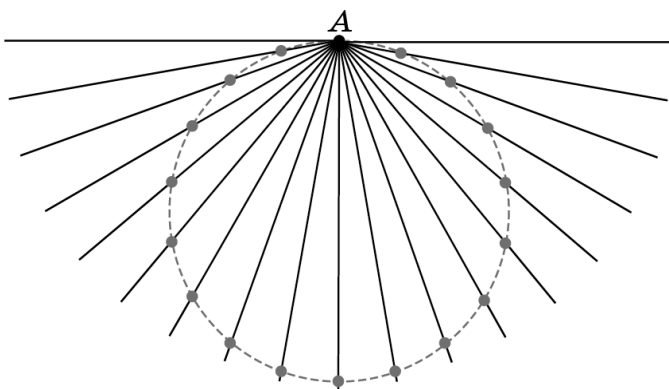
Примечание для жюри

Полностью правильное решение, полученное неавторским методом, оценивается полным баллом. Недопустимо снижать оценку за «неправильное» оформление или неаккуратные записи.

3. Бусинки (Рубцов Д.)

Множество спиц, выходящих из одной точки A , расположены в вертикальной плоскости. Из этой точки одновременно отпускают маленькие бусинки. Каждой спице принадлежит одна бусинка. Определите, как должна зависеть начальная скорость бусинок от угла наклона φ спицы к **вертикали**, чтобы через время τ все бусинки оказались на окружности (см. рисунок) диаметра $g\tau^2/2$. Решите задачу для двух случаев:

1. трения нет;
2. коэффициент трения μ .



Возможное решение

В отсутствие трения зависимость ускорения a бусинок от угла φ : $a(\varphi) = g \cos \varphi$, значит, пройденный бусинкой за время τ путь: $l(\varphi) = v_0(\varphi)\tau + \frac{g \cos \varphi \tau^2}{2}$. Так как через время τ все бусинки оказываются на окружности диаметра $g\tau^2/2$, то из геометрии $l(\varphi) = \frac{g\tau^2}{2} \cos \varphi$. Видно, что $v_0(\varphi) = 0$.

Если есть трение, то ускорение $a(\varphi) = g(\cos \varphi - \mu \sin \varphi)$, пройденный путь $l(\varphi) = v_0(\varphi)\tau + \frac{a(\varphi)\tau^2}{2}$ или $l(\varphi) = \frac{g\tau^2}{2} \cos \varphi$. Откуда: (1) $v_0(\varphi) = \frac{g\tau\mu}{2} \sin \varphi$. Заметим, что во время движения бусинка может как ускоряться, так и замедляться – это зависит от соотношения между углом φ и коэффициентом трения μ . Значит, (2) некоторые бусинки могли остановиться, доехав до $l(\varphi) = \frac{g\tau^2}{2} \cos \varphi$. Случай (2) – когда бусинка останавливается как раз в нужном месте. Выражение для конечной скорости $v(\varphi) = g\tau(\cos \varphi - \frac{\mu}{2} \sin \varphi)$, откуда следует ограничение для случая (1): $\text{ctg } \varphi > \frac{\mu}{2}$. Для $\text{ctg } \varphi < \frac{\mu}{2}$ бусинка должна остановиться до момента времени τ в нужном месте. Используя формулу тормозного пути $\frac{g\tau^2}{2} \cos \varphi = \frac{v_0^2}{2g(\mu \sin \varphi - \cos \varphi)}$, получим ответ для случая (2): $v_0(\varphi) = g\tau \sqrt{\cos \varphi (\mu \sin \varphi - \cos \varphi)}$.

Ответ:

Если спицы гладкие, $v_0(\varphi) = 0$

Если нет, то
$$v_0(\varphi) = \begin{cases} \frac{g\tau\mu}{2} \sin \varphi, & \text{при } \operatorname{ctg} \varphi \geq \frac{\mu}{2} \\ g\tau \sqrt{\cos \varphi (\mu \sin \varphi - \cos \varphi)}, & \text{при } \operatorname{ctg} \varphi < \frac{\mu}{2} \end{cases}$$

Критерии оценивания

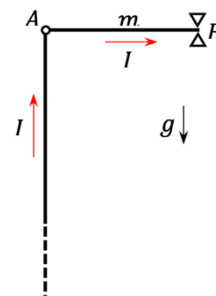
№	Критерий	Балл
1	Записано геометрическое условие: $l(\varphi) = \frac{g\tau^2}{2} \cos \varphi$ (из диаметра окружности $\frac{g\tau^2}{2}$)	1
2	Для случая без трения записано уравнение движения вдоль спицы: $l(\varphi) = v_0(\varphi)\tau + g \cos \varphi \cdot \frac{\tau^2}{2}$	1
3	Для случая без трения получено $v_0(\varphi) = 0$	1
4	Для случая с трением записано ускорение вдоль спицы: $a(\varphi) = g(\cos \varphi - \mu \sin \varphi)$	1
5	Для случая с трением записано уравнение движения: $l(\varphi) = v_0(\varphi)\tau + \frac{a(\varphi)\tau^2}{2}$	1
6	Для режима без остановки ($a(\varphi) > 0$) получено $v_0(\varphi) = \frac{g\tau\mu}{2} \sin \varphi$	1
7	Определено граничное условие между режимами: $\operatorname{ctg} \varphi = \frac{\mu}{2}$	1
8	Для режима с остановкой ($a(\varphi) < 0$) записано выражение для тормозного пути: $\frac{g\tau^2}{2} \cos \varphi = \frac{v_0^2}{2g(\mu \sin \varphi - \cos \varphi)}$	1
9	Для режима с остановкой получено $v_0(\varphi) = g\tau \sqrt{\cos \varphi (\mu \sin \varphi - \cos \varphi)}$	1
10	Итоговый ответ записан в виде кусочно-заданной функции с указанием промежутков	1

Примечание для жюри

Полностью правильное решение, полученное неавторским методом, оценивается полным баллом. Недопустимо снижать оценку за «неправильное» оформление или неаккуратные записи.

4. Жёсткий стержень (Клепиков М.)

Однородный жесткий проводящий стержень состоит из двух частей: первая, вертикальная, полубесконечная и неподвижная, вторая – горизонтальная массой m , один из концов которой свободно вставлен в зазор между опорами (точка B на рисунке). Обе части соединены шарнирно в точке A . По стержню с помощью невесомых гибких проводников пропускается постоянный ток I . Трением в системе пренебречь.



1. Постройте качественный график зависимости проекции силы F_B давления опоры на стержень в точке B от силы тока I . Укажите на графике характерные точки.
2. С каким ускорением a_B начнет двигаться точка B стержня если мгновенно убрать опору, не нарушая условия протекания тока?

Возможное решение

1. Индукция магнитного поля, созданного вертикальной частью проводника, в точках горизонтального проводника направлена от нас и равна по модулю:

$$B = \frac{1}{2} B_{\infty} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I}{x},$$

где x – расстояние от точки A , B_{∞} – поле бесконечного прямого проводника с током. Элементарная сила Ампера, действующая на бесконечно малый участок dx провода AB , направлена вверх и равна по модулю:

$$dF_A = I \cdot B(x) \cdot dx = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I^2}{x} \cdot dx$$

Умножив последнее выражение на x , получим элементарный момент силы Ампера относительно оси вращения, проходящей через точку A перпендикулярно плоскости рисунка:

$$dM_A = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \cdot dx.$$

Проинтегрировав по всей длине AB , получим

$$M_A = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \cdot l,$$

где l – неизвестная длина части стержня AB .

Уравнение моментов сил относительно выбранной оси:

$$M_A - mg \cdot \frac{l}{2} - F_B \cdot l = 0,$$

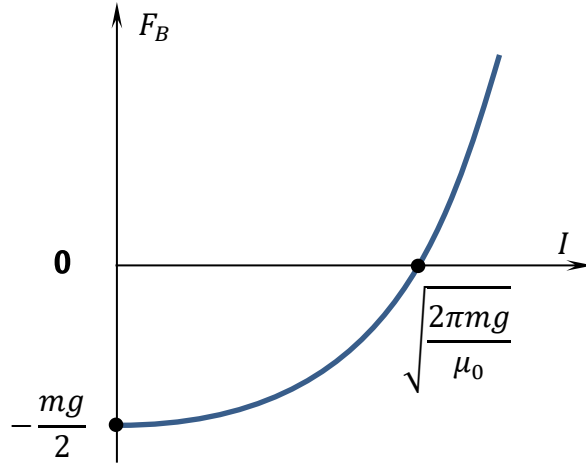
$$\frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \cdot l - mg \cdot \frac{l}{2} - F_B \cdot l = 0,$$

Откуда получим

$$F_B(I) = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} - \frac{mg}{2}.$$

График данной зависимости представляет собой параболу, ветви которой направлены вверх. Вершина параболы находится в точке $(0, -\frac{mg}{2})$, что соответствует случаю

отсутствия тока в системе. Точка пересечения графика с осью абсцисс $\left(\sqrt{\frac{2\pi mg}{\mu_0}}, 0\right)$ соответствует силе тока, при которой стержень не взаимодействует с опорой в точке B (сумма моментов силы тяжести и силы Ампера равна нулю).



2. Для нахождения ускорения точки B запишем основное уравнение динамики вращательного движения:

$$\sum \vec{M}_i = \vec{\varepsilon} \cdot J,$$

Где $J = \frac{ml^2}{3}$ – момент инерции стержня относительно его конца.

$$\frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \cdot l - mg \cdot \frac{l}{2} = \frac{ml^2}{3} \cdot \varepsilon.$$

Линейное ускорение точки B в начальный момент времени после удаления опоры:

$$a_B = \varepsilon \cdot l,$$

С учетом этого, получим

$$a_B = \frac{3\mu_0 I^2}{4\pi m} - g \cdot \frac{3}{2}.$$

При положительном значении a_B ускорение точки B направлено вверх, при отрицательном – вниз.

Критерии оценивания

№	Критерий	Балл
1	Получена зависимость $B(x) = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{l}{x}$. Вывод из закона Био-Савара-Лапласа оценивается так же, как и рассуждение через половину поля бесконечного провода.	1
2	Выражение для момента силы Ампера $M_A = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \cdot l$	1
3	Правило моментов $M_A - mg \cdot \frac{l}{2} - F_B \cdot l = 0$	1
4	Получено выражение $F_B(I) = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} - \frac{mg}{2}$	1
5	Построен качественный график - Указано, что график является частью параболы, оси которой направлены вверх - Указаны значения величин в точках пересечения с осями (по 0,5 за каждую)	2

6	Уравнение динамики вращательного движения $\sum \vec{M}_i = \vec{\varepsilon} \cdot J$	1
7	Получен или записан момент инерции стержня относительно оси, проходящей через точку A	1
8	Связь линейного ускорения края стержня с угловым ускорением	1
9	Получено выражение $a_B = \frac{3\mu_0 I^2}{4\pi m} - g \cdot \frac{3}{2}$	1

Примечание для жюри

Полностью правильное решение, полученное неавторским методом, оценивается полным баллом. Недопустимо снижать оценку за «неправильное» оформление или неаккуратные записи.

5. Фокус с исчезновением (Жигар А.)

Точечный источник света находится на главной оптической оси тонкой линзы. При смещении источника вдоль оси на расстояние $L = 40$ см в сторону линзы изображение исчезает.

Если из исходного положения сместить источник в перпендикулярном направлении на такое же расстояние L , то поперечное увеличение линзы становится равным $1/3$.

1. Какая это линза — собирающая или рассеивающая?
2. На каком расстоянии от линзы находился источник первоначально?
3. Найдите фокусное расстояние линзы.

Возможное решение

1. Изображение исчезает только в случае собирающей линзы, когда источник попадает в фокальную плоскость. У рассеивающей линзы изображение мнимое при любом положении источника. Линза собирающая.

2. При смещении вдоль оси на $L = 40$ см источник оказывается в фокусе. Из того, что изображение исчезает только при $d > F$, следует:

$$d - L = F$$

3. При поперечном смещении на L расстояние до линзы остаётся d . Поперечное увеличение:

$$\Gamma = \frac{f}{d} = \frac{1}{3} \Rightarrow f = \frac{d}{3}$$

Для собирающей линзы:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$$

Подставляем:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{3}{d} = \frac{4}{d} \Rightarrow d = 4F$$

Решая систему уравнений:

$$4F - 40 = F \Rightarrow 3F = 40 \Rightarrow F = \frac{40}{3} \text{ см}$$

$$d = 4F = \frac{160}{3} \text{ см}$$

Всероссийская олимпиада школьников по физике
Муниципальный этап. 01.12.2025 г.
11 класс

Критерии оценивания

№	Критерий	Балл
1	Правильное определение типа линзы с обоснованием	1 балл
2	Запись условия для первого перемещения: $d - L = F$	1 балл
3	Обоснование выбора знака ($d > F$)	1 балл
4	Запись условия для поперечного увеличения: $\Gamma = 1/3$	1 балл
5	Связь f и d из увеличения: $f = d/3$	1 балл
6	Правильное применение формулы тонкой линзы	1 балл
7	Получение связи $d = 4F$ из формулы линзы	1 балл
8	Составление системы уравнений	1 балл
9	$F = \frac{40}{3} \text{ см}$	1 балл
10	$d = \frac{160}{3} \text{ см}$	1 балл

Примечание для жюри

Полностью правильное решение, полученное неавторским методом, оценивается полным баллом. Недопустимо снижать оценку за «неправильное» оформление или неаккуратные записи.