



Решение

- I [Условие](#)
- II [Решение](#)
- III [Подсказки](#)
- IV [Разбалловка](#)
- V [Материалы](#)
- # Редактировать

1 ?? В каком направлении (AB или BA) сместится полоска при большом количестве циклов?

при изменении длины полоски в результате нагрева или охлаждения различные участки полоски движутся относительно стола в противоположных направлениях. При этом существует точка, неподвижная относительно стола. Положение такой точки определяется из условия равенства действующей на полоску результирующей силы трения. Пусть расстояние этой точки от левого конца полоски при нагреве (т. C_1) равно x_1 , при охлаждении (т. C_2) - x_2 (рис.2)

При нагреве

$$F_{\text{тр}1}' = F_{\text{тр}2}'$$

$$\mu_1 m \frac{l - x_1}{l} g = \mu_2 m \frac{x_1}{l} g$$

$$x_1 = \frac{\mu_1}{\mu_1 + \mu_2} l$$

Левый край полоски (т. A) сместится в результате нагрева на ΔT влево на расстояние

$$x' = x_1 \alpha \Delta T.$$

При охлаждении аналогично

$$F_{\text{тр}1}'' = F_{\text{тр}2}''$$

$$\mu_1 m \frac{x_2}{l} g = \mu_2 m \frac{l - x_2}{l} g$$

$$x_2 = \frac{\mu_2}{\mu_1 + \mu_2} l$$

А левый край полоски смещается вправо на

$$x'' = x_2 \alpha \Delta T$$

За один цикл нагрев-охлаждение левый край и вся полоска сместятся влево на расстояние

$$\Delta x = x' - x'' = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_1 + \mu_2} l \alpha \Delta T$$

Учитывая, что $\mu_2 < \mu_1$ получаем, что $\Delta x > 0$, значит полоска смещается влево.

Ответ: Влево

2 ?? На какое расстояние переместится полоска за N циклов нагревания-охлаждения, если разность максимальной и минимальной температур в цикле равна ΔT ? Ответ запишите в виде формулы.

Ответ: За N циклов смещение полоски составит

$$\Delta X = N\Delta x = N \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_1 + \mu_2} l \alpha \Delta T$$

3^{??} Вычислите, на какое расстояние переместится полоска длины $l = 20\text{см}$ за $N = 100$ циклов нагрева-охлаждения при изменении ее температуры на $\Delta T = 80^\circ\text{C}$. Значения коэффициентов трения $\mu_1 = 0.15, \mu_2 = 0.05$.

Ответ: $\Delta X = 16\text{см}$



Решение

- I [Условие](#)
- Σ [Решение](#)
- Н [Подсказки](#)
- М [Разбалловка](#)
- Е [Материалы](#)
- # Редактировать ▾

1 ?? плотность ρ_2 и скорость v_2 газа на выходе из трубы;

Поскольку система находится в стационарном состоянии, то масса газа в трубе в любой момент постоянна. Значит масса газа втекающего в трубу за малое время dt должна равняться массе вытекающего газа

$$\rho_1 S v_1 dt = \rho_2 S v_2 dt = \mu dt,$$

где μ - массовый расход газа.

↵

Так как сечение трубы постоянное и вязкое трение мало, то импульс газа, находящегося в трубе, изменяется за счет сил давления окружающего газа на торцы трубы. Запишем изменение импульса газа, находящегося в трубе, в проекции на ось x , направленную по движению газа:

$$dp_x = (P_1 S - P_2 S) dt.$$

С другой стороны, так как скорость газа в любом сечении остается постоянной, то изменение импульса газа, находящегося в трубе, можно рассчитать как разность импульсов порции газа, вышедшей из трубы за малое время dt и импульса порции газа, вошедшей в трубу за это время

$$dp_x = \mu (v_2 - v_1) dt$$

Приравнивая выражения для dp_x и используя выражение для μ , получим:

Ответ:

$$\rho_2 = \frac{\rho_1^2 v_1^2}{\rho_1 v_1^2 - \Delta P}; \left(\rho_2 = \frac{\rho_1^2 v_1^2}{\rho_1 v_1^2 + P_1 - P_2} \right)$$
$$v_2 = v_1 - \frac{\Delta P}{\rho_1 v_1}; \left(v_2 = v_1 - \frac{P_2 - P_1}{\rho_1 v_1} \right)$$

2 ?? отношение температур газа T_2/T_1 на выходе и на входе в трубу соответственно;

Из уравнение состояния идеального газа, записанного для порций газа на входе в трубу и на выходе из нее имеем:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{P_2 \rho_1}{P_1 \rho_2} = \frac{P_2 v_2}{P_1 v_1},$$

откуда

Ответ:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(1 + \frac{\Delta P}{P_1} \right) \left(1 - \frac{\Delta P}{\rho_1 v_1^2} \right); \left(\frac{T_2}{T_1} = \frac{P_2}{P_1} \left(1 - \frac{P_2 - P_1}{\rho_1 v_1^2} \right) \right)$$

3 ?? тепловую мощность N , выделяемую трубой в окружающую среду.

Запишем закон сохранения энергии для газа находящегося в трубе. рассмотрим малый промежуток времени dt . За это время над газом совершают работу

Согласно закону сохранения энергии для течения идеального газа, рассматриваемого в течение времени dt , изменение энергии под действием внешних сил давления, изменяются его кинетическая и внутренняя энергии и часть энергии выделяется в окружающую среду

$$P_1dV_1 - P_2dV_2 = \mu dt \left(\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + \frac{C_V}{M}(T_2 - T_1) \right) + Ndt,$$

где M - молярная масса газа.
\newline
Таким образом

$$N = \rho_1 S v_1 \left(\frac{v_1^2 - v_2^2}{2} + \frac{C_P}{M}(T_1 - T_2) \right)$$

Подставив полученные ранее соотношения, окончательно получим

Ответ:

$$N = \rho_1 S v_1 \left(\frac{v_1^2}{2} \left(1 - \left(1 - \frac{\Delta P}{\rho_1 v_1^2} \right)^2 \right) + \frac{4P_1}{\rho_1} \left(1 - \left(1 + \frac{\Delta P}{P_1} \right) \left(1 - \frac{\Delta P}{\rho_1 v_1^2} \right) \right) \right) \\ \left(N = \rho_1 S v_1 \left(\frac{v_1^2}{2} \left(1 - \left(1 - \frac{P_2 - P_1}{\rho_1 v_1^2} \right)^2 \right) + \frac{4P_1}{\rho_1} \left(1 - \frac{P_2}{P_1} \left(1 - \frac{P_2 - P_1}{\rho_1 v_1^2} \right) \right) \right) \right)$$



Решение

- I [Условие](#)
- S [Решение](#)
- H [Подсказки](#)
- M [Разбалловка](#)
- E [Материалы](#)
- # [Редактировать](#) ▼

1 ?? величину напряжения $\mathcal{E}$ внутреннего источника омметра;

При подключении к клеммам омметра резистора его сопротивление вычисляется омметром по величине протекающего тока по формуле

$$R_{\text{изм}} = \frac{\mathcal{E}}{I} - r.$$

При подключении к клеммам любых других электрических элементов вычисления производятся по этой же формуле (омметр не может определить что именно к нему подключено и предполагает, что подключен резистор).

При подключении диода в прямом направлении величина тока через него

$$I_D = \frac{\mathcal{E} - U_0}{r}.$$

С другой стороны можем выразить этот же ток из показаний омметра

$$I_D = \frac{\mathcal{E}}{r + R_D},$$

откуда получим

$$\frac{\mathcal{E} - U_0}{r} = \frac{\mathcal{E}}{r + R_D}$$

Для диода, соединенного с резистором, получим аналогичное соотношение

$$\frac{\mathcal{E} - U_0}{r + R} = \frac{\mathcal{E}}{r + R_1}.$$

Поделив два предыдущих соотношения друг на друга, получим:

$$\frac{r}{r + R} = \frac{r + R_D}{r + R_1},$$

откуда

$$r = \frac{RR_D}{R_1 - R_D - R} = 30\text{кОм};$$

$$U_0 = \mathcal{E} \frac{R_D}{r + R_D} = \mathcal{E} \frac{R_1 - R_D - R}{R_1 - R_D} = \frac{\mathcal{E}}{6}$$

Рассмотрим подключение батарейки. Отрицательное значение сопротивления на экране омметра может получаться по двум причинам:

- а) батарейка включена в том же направлении, что источник (минус батарейки подключен к плюсу источника), при этом ток в цепи превосходит ток короткого замыкания, и результат вычисления омметром по заложенной в него формуле становится отрицательным;
- б) батарейка включена навстречу внутреннему источнику омметра, при этом напряжение батарейки больше напряжения источника и ток течет в противоположном “правильному” направлению при измерении обычного сопротивления. Эти случаи придется рассматривать отдельно

Случай «а»:

$$I_{\text{Б}} = \frac{\mathcal{E} + U_{\text{Б}}}{r} = \frac{\mathcal{E}}{r + R_{\text{Б}}},$$

откуда

2020 -- We are what they grow beyond.



Решение

- I [Условие](#)
- Σ [Решение](#)
- Н [Подсказки](#)
- М [Разбалловка](#)
- Е [Материалы](#)
- # Редактировать ▾

1 ?? Найдите векторы напряженности электрического поля цилиндра в точках, близких к его центру и имеющих координаты $(x; 0)$ и $(0; y)$. Считайте $x, y \ll R$.

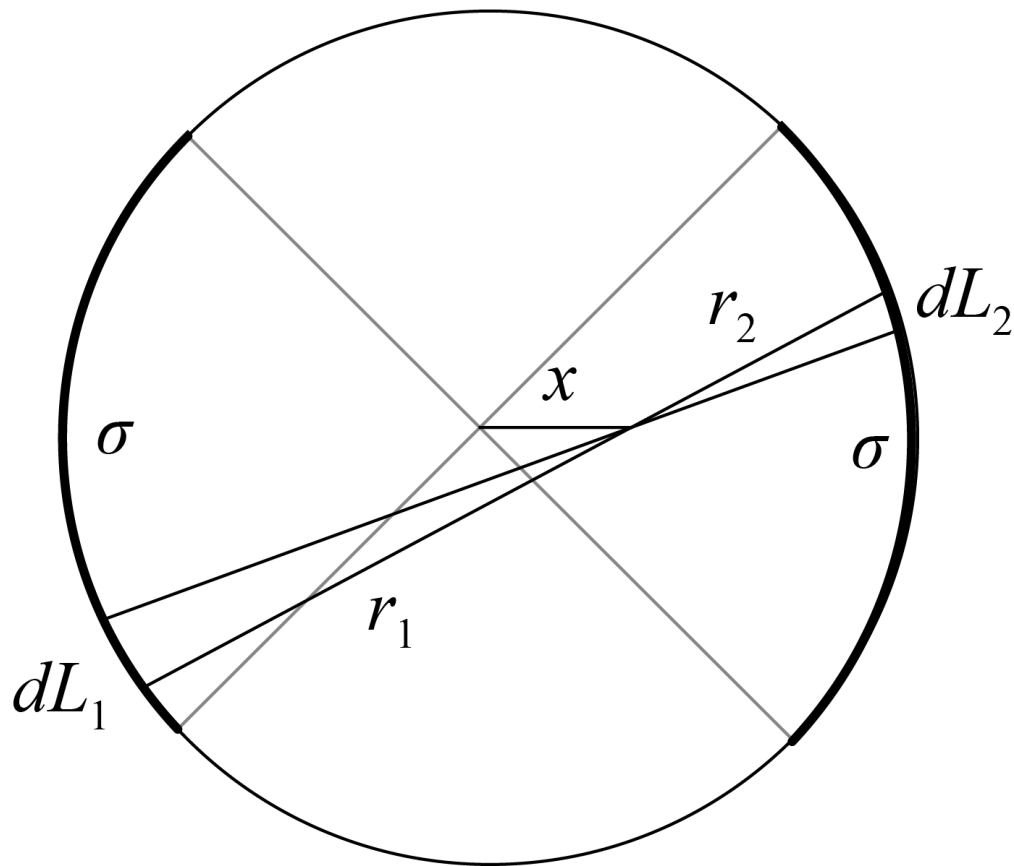
Поле цилиндра можно представить как сумму полей бесконечно длинных тонких нитей (узких полосок), заряженных с постоянной линейной плотностью заряда λ . Найдём поле такой нити на расстоянии r от нее, воспользовавшись симметрией поля и теоремой Гаусса

$$\Phi = 2\pi r L E_r = \frac{q}{\epsilon_0} = \frac{\lambda L}{\epsilon_0}$$

откуда следует:

$$E_r = \frac{\lambda}{2\pi r \epsilon_0}.$$

Найдём напряжённость поля в точке с координатами $(x; 0)$. Рассмотрим два выделенных на рисунке небольших участка цилиндра.



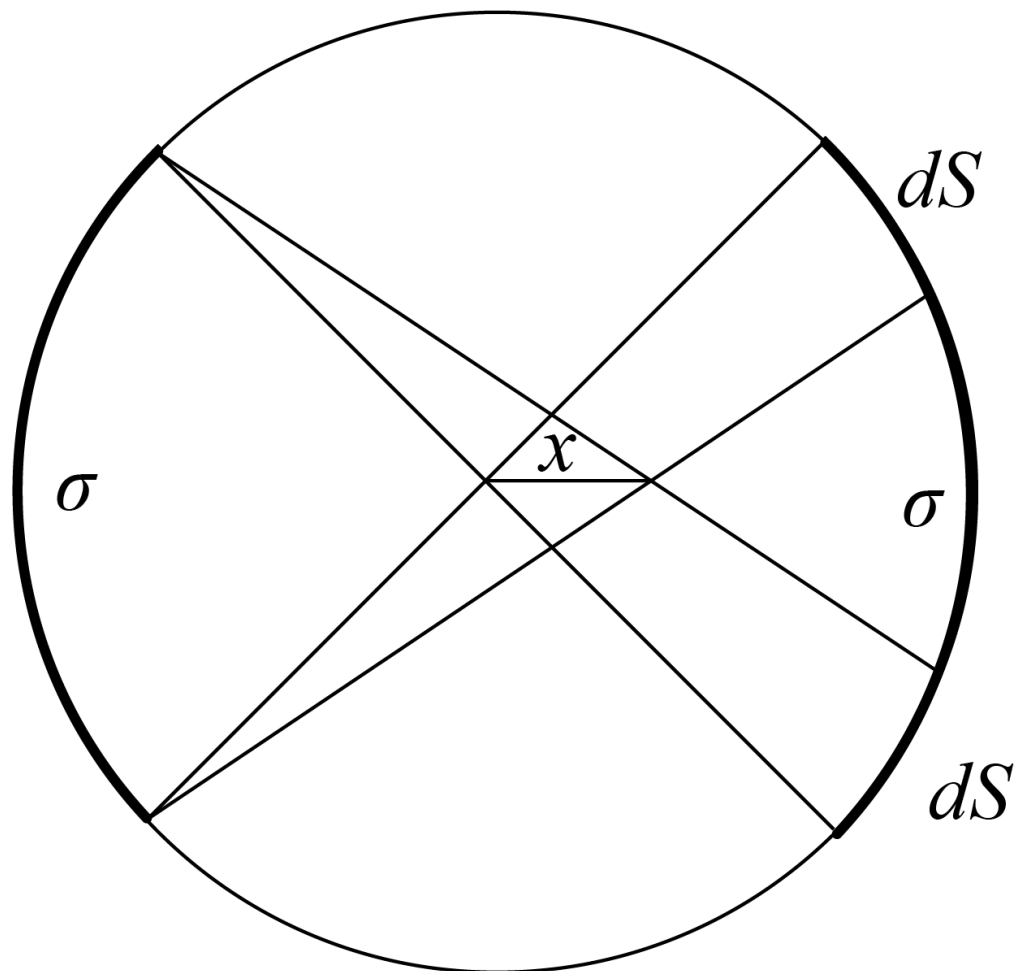
Они создают противоположно направленные поля как от двух нитей с линейными плотностями заряда σdL_1 и σdL_2 соответственно. Из подобия треугольников имеем:

$$\frac{dL_1}{r_1} = \frac{dL_2}{r_2},$$

поэтому

$$dE_1 = \frac{\sigma dL_1}{2\pi r_1 \epsilon_0} = \frac{\sigma dL_2}{2\pi r_2 \epsilon_0} = dE_2,$$

и эти два поля друг друга компенсируют. Исходя из этого ясно, что поле цилиндра в рассматриваемой точке эквивалентно суммарному полю двух выделенных полосок шириной dS каждая, поля которых не компенсируются (см.рис.)



При этом

$$dS = x\sqrt{2},$$

и каждая полоска создаёт поле, равное

$$E_0 = \frac{\sigma x\sqrt{2}}{2\pi R\epsilon_0}$$

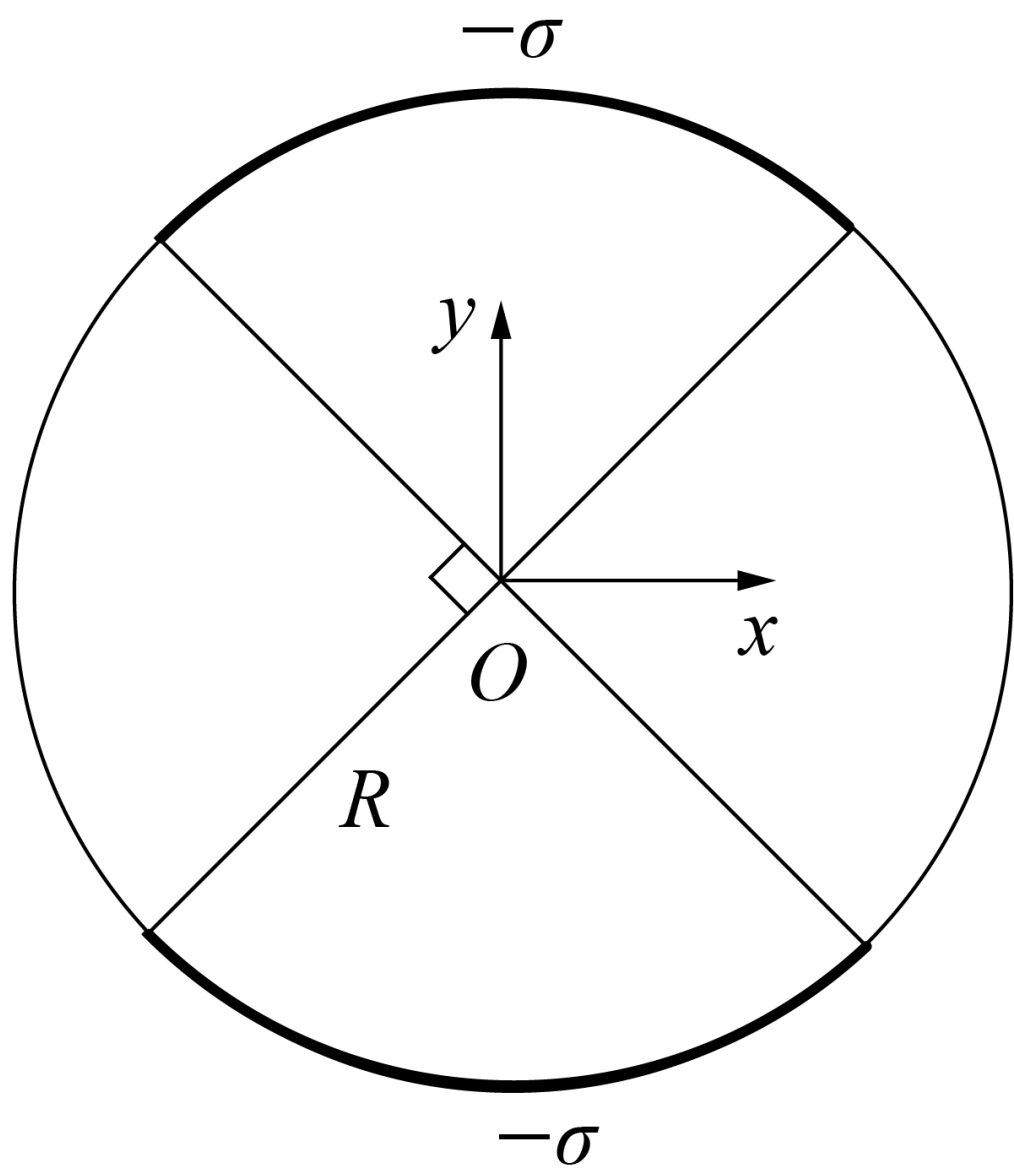
Поля этих полосок компенсируют друг друга в направлении оси y , поэтому $E_y = 0$, а проекция поля на ось x равна

$$E_x = 2 \cdot \frac{-E_0}{\sqrt{2}} = -\frac{\sigma x}{\pi R\epsilon_0}.$$

Таким образом, результирующее поле направлено к оси цилиндра.

\newline

Для нахождения поля в точке $(y, 0)$ представим исходный цилиндр как суперпозицию полностью заряженного цилиндра с поверхностной плотностью заряда $+\sigma$ и двух четвертинок с поверхностной плотностью $-\sigma$ (см рис.)



Поле E_1 , создаваемое двумя отрицательно заряженными четвертинками, аналогично, найденному в первом случае, поэтому можем воспользоваться готовым результатом:

$$E_{1_y} = \frac{\sigma y}{\pi R \epsilon_0}; E_{1_x} = 0$$

Поле, создаваемое в точке $(y, 0)$, равномерно заряженным цилиндром из соображений симметрии и теоремы Гаусса равно нулю. Тогда по принципу суперпозиции проекции результирующего поля E' в искомой точке равны:

$$E_{y'} = \frac{\sigma y}{\pi R \epsilon_0}; E_{x'} = 0.$$

Поле E' направлено от оси цилиндра.

ответ.

2020 -- We are what they grow beyond.

$$E_{y'} = \frac{\sigma y}{\pi R \epsilon_0}; E_{x'} = 0.$$



Решение

- I [Условие](#)
- Σ [Решение](#)
- Н [Подсказки](#)
- М [Разбалловка](#)
- Е [Материалы](#)
- # Редактировать ▾

1 ?? При каком значении $x = x_{\text{кр}}$ произошло бы столкновение зондов, если бы двигатели на них не включались?

Зонды столкнутся, если одновременно окажутся в точке пересечения траекторий. Если двигатели не включались, то зонды движутся равномерно, поэтому:

$$\frac{x_{\text{кр}}}{v} = 3 \frac{\sqrt{L^2 - x_{\text{кр}}^2}}{v},$$

откуда

Ответ:

$$x_{\text{кр}} = \frac{3L}{\sqrt{10}}$$

2 ?? Найдите минимальное значение силы тяги $F_{\text{мин}}$ при котором зонды не столкнутся, если $x = x_{\text{кр}}$.

Вопрос 2.

\newline

Так как $x = x_{\text{кр}}$, то вектор относительной скорости второго зонда относительно первого $\vec{v}_{\text{отн}} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1$ в момент включения двигателей направлен строго на первый зонд.

Перейдём в систему отсчёта, связанную с первым зондом. В ней на второй зонд действуют сила тяги двигателя и сила инерции, равная

$$\vec{F}_{\text{и}} = m_2 \frac{-\vec{F}}{m_1}.$$

Из этого следует, что второй зонд движется прямолинейно.

\newline

Найдём модуль скорости второго зонда в момент, когда расстояние между зондами равно S . Запишем закон изменения кинетической энергии:

$$\frac{m_2 v_{\text{отн}}^2}{2} - \frac{m_2 v_{\text{отн}0}^2}{2} = A_F + A_{F_{\text{и}}} = \left(-\vec{F} + \vec{F}_{\text{и}} \right) \Delta \vec{r}_{\text{отн}},$$

откуда:

$$\frac{m_2 v_{\text{отн}}^2}{2} - \frac{m_2 v_{\text{отн}0}^2}{2} = -F \left(1 + \frac{m_2}{m_1} \right) (L - S).$$

Минимально возможная сила достигается, если при расстоянии $S = 0$ между зондами их относительная скорость равна нулю, поэтому:

$$F_{\text{мин}} = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \cdot \frac{v_{\text{отн}0}^2}{2L} = \frac{4mv^2}{9L}.$$

Ответ:

$$F_{\text{мин}} = \frac{4mv^2}{9L}$$

3^{??} Пусть величины сил тяги двигателей равны $F = F_{\text{мин}} + dF$ ($dF \ll F_{\text{мин}}$), а $x = x_{\text{кр}}$. Найдите **вектор** конечной скорости первого зонда в виде $\alpha \vec{v}_1 + \beta \vec{v}_2$.

Вопрос 3.

\newline

Поскольку по условию $dF \ll F_{\text{мин}}$, будем считать, что $F = F_{\text{мин}}$. Подставляя в закон изменения кинетической энергии (1) выражение для $F_{\text{мин}}$, получим:

$$\frac{m_2 v_{\text{отн}}^2}{2} = FS \left(1 + \frac{m_2}{m_1} \right).$$

Из этого следует, что в момент, когда расстояние между зондами $S = 2L$

$$|v_{\text{отн}}| = \sqrt{2} |v_{\text{отн}_0}|.$$

Направление относительной скорости меняется на противоположное, поэтому

$$\vec{v}_{\text{отн}} = -\sqrt{2} \vec{v}_{\text{отн}_0}.$$

Вернёмся в исходную систему отсчёта.

\newline

Равнодействующая сила, действующая на систему из двух зондов, равняется нулю, поэтому центр масс системы движется с постоянной скоростью, равной

$$\vec{v}_C = \frac{\vec{v}_1 + 4\vec{v}_2}{5}.$$

Отсюда для скорости первого Зонда относительно центра масс $\vec{v}_{1_{\text{отн}_C}}$ получаем:

$$\vec{v}_{1_{\text{отн}_C}} = \vec{v}_1 - \vec{v}_C = \frac{4}{5}(\vec{v}_1 - \vec{v}_2) = -\frac{4}{5}\vec{v}_{\text{отн}}.$$

где $\vec{v}_{\text{отн}} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1$.

\newline

Получим окончательное выражение для вектора конечной скорости второго зонда

$$\vec{v}_k = \vec{v}_C + \vec{v}_{1_{\text{отн}_C}} = \vec{v}_C - \frac{4\sqrt{2}}{5}\vec{v}_{\text{отн}_0} = \frac{1}{5}\vec{v}_1 (1 - 4\sqrt{2}) + \frac{4}{5}\vec{v}_2 (1 + \sqrt{2})$$

Ответ:

$$\vec{v}_k = \frac{1}{5}\vec{v}_1 (1 - 4\sqrt{2}) + \frac{4}{5}\vec{v}_2 (1 + \sqrt{2})$$

4^{??} Пусть сила тяги двигателей равна F , а $x = x_1$ ($x_1 > x_{\text{кр}}$). Найдите **модуль** конечной скорости первого зонда относительно второго.

Вновь перейдём в систему отсчёта, связанную с первым зондом. Учтём, что при произвольном значении x относительное движение второго зонда перестаёт быть прямолинейным, так как $\vec{v}_{\text{отн}_0}$ перестаёт быть направленной на первый зонд, следовательно, относительное ускорение становится неколлинеарным начальной относительной скорости.

\newline

Запишем закон изменения кинетической энергии для малого относительного перемещения зондов:

$$dE_k = \left(-\vec{F} + \vec{F}_{\text{и}} \right) d\vec{r}_{\text{отн}} = -\vec{F} \left(1 + \frac{m_2}{m_1} \right) d\vec{r}_{\text{отн}} = -F \left(1 + \frac{m_2}{m_1} \right) dS,$$

поскольку вектор силы тяги всегда направлен против направления на второй зонд. Полученное выражение оказывается применимым при любых значениях x и не зависит от формы траектории. Поэтому, используя результат, полученный при решении второго вопроса для значения $S = 2L$

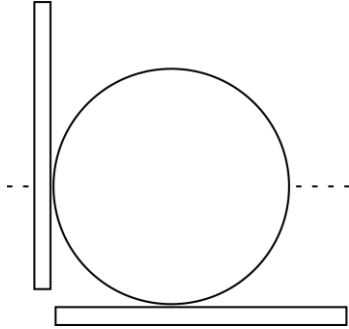
$$v_{\text{отн}} = \sqrt{v_{\text{отн}_0}^2 + \frac{2FL(m_1 + m_2)}{m_1 m_2}} = \sqrt{\frac{10v^2}{9} + \frac{5FL}{2m}}.$$

Ответ:

$$v_{\text{отн}} = \sqrt{\frac{10v^2}{9} + \frac{5FL}{2m}}.$$

Возможное решение

Для начала соберем экспериментальную установку. Для этого закрепим лист миллиметровой бумаги на столе с помощью скотча. Также с помощью скотча закрепим на столе две линейки, параллельно линиям на миллиметровке, перпендикулярно друг другу. С помощью миллиметровки определим, что диаметр «серого ящика» (далее СЯ) $D = 13,0$ см, значит его радиус $R = 7,5$ см. Проведем на листе миллиметровки линию, параллельную одной из линеек на расстоянии 7,5 см от нее. Положим СЯ в угол, образованный линейками. Схема установки представлена на рисунке.



Для начала определим размер и расположение внутреннего цилиндра.

Опыт №1.

Временно уберем СЯ и расположим лазер на листе миллиметровки так, чтобы его луч шел вдоль пунктирной линии. Для удобства работы лазер зажем в прищепку и подберем такое его положение, чтобы луч лазера распространялся параллельно столу.

Теперь поместим СЯ в угол из линеек и будем вращать его вокруг вертикальной оси так, чтобы он оставался прижатым к обеим линейкам. При некоторых углах поворота луч лазера на выходе из СЯ будет также идти вдоль пунктирной прямой. Это возможно в одном из двух случаев: 1) луч не задевает малый цилиндр; 2) луч проходит через центры обоих цилиндров.

В первом случае при повороте СЯ на некоторый угол луч будет оставаться неподвижным. Найдем границы этой области (предельные углы поворота, после которых луч лазера начинает смещаться). Нарисуем на верхней поверхности СЯ прямые, соединяющие точку входа и выхода лазера при указанных выше предельных углах. Эти прямые демонстрируют ход луча внутри СЯ и являются касательными к внутреннему цилиндру.

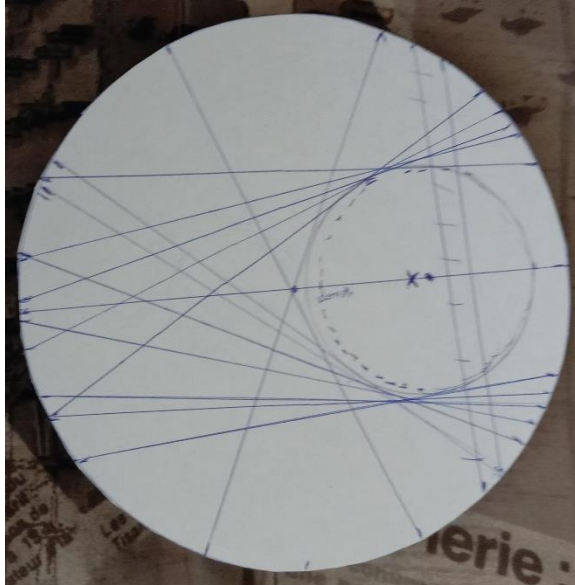
Во втором случае при повороте СЯ на небольшой угол в любую из сторон луч сразу будет отклоняться. Подберем положение СЯ, соответствующее второму случаю, и также проведем на поверхности СЯ прямую, соединяющую точки входа и выхода лучей. Центр внутреннего цилиндра будет расположен где-то на этой прямой.

Построенных прямых недостаточно для однозначного определения r и d .

Опыт №2.

Сместим лазер так, чтобы теперь он светил не вдоль пунктирной прямой и вновь будем вращать СЯ. Если луч внутри СЯ не попадает на внутренний цилиндр, то при малом повороте СЯ ход луча относительно стола не изменится, в противном случае – изменится. Вращая СЯ мы можем находить предельные углы поворота, после которых ход луча начинает изменяться. При таком предельном угле луч лазера внутри СЯ идет по касательной к внутреннему цилиндру. Будем находить предельные углы и для каждого из них рисовать на поверхности ящика траекторию луча, соединив прямой точку входа луча в СЯ и точку выхода. Проделаем это несколько раз при различных положениях лазера и

получим на поверхности ящика набор касательных к поверхности внутреннего цилиндра. (см. фото)



Теперь необходимо построить окружность, для которой эти линии являются касательными (с учетом погрешностей). Для этого удобно использовать циркуль. Так как мы знаем на какой прямой находится центр внутреннего диска, то устанавливая циркуль в различных точках этой прямой пытаемся подбирать такой радиус, чтобы наши прямые касались окружности. Если циркуля нет, то его можно легко изготовить. Достаточно оторвать небольшую полоску бумаги, проделать в ней небольшое отверстие острием карандаша и приставив карандаш к СЯ использовать его острие как ось вращения полоски бумаги. На полоске нужно нанести шкалу, чтобы лучше ориентироваться в расстояниях.

После построения окружности измерим ее радиус и расстояние до центра СЯ. Получим $r = 3$ см, $d = 3,5$ см. Погрешность оценим качественно, попробовав сместить центр окружности в другое место и изменив радиус. Так как касательные проводятся с достаточно большой точностью, то погрешность не превышает 2 мм.

Окончательно получим: $r = 3,0 \pm 0,2$ см, $d = 3,5 \pm 0,2$ см.

В ходе проведения опытов можно было заметить, что при некоторых углах поворота СЯ имеются два выходящих луча. Это связано с тем, что падающий на границу внутреннего цилиндра свет частично преломляется, а частично отражается. Также можно заметить, что при некоторых углах поворота СЯ преломленный луч исчезает и остается только отраженный. Это свидетельствует о полном внутреннем отражении луча на границе внутреннего цилиндра, а значит его показатель преломления меньше, чем у внешнего.

Опыт №3.

Повернем СЯ так, чтобы внутренний цилиндр оказался «снизу». Затем будем светить лазером под разными углами в точку пересечения СЯ с пунктирной линией. Каждый раз будем отмечать точку, в которой расположен лазер и точку выхода. Проведем такой опыт для трех разных углов, затем убрав СЯ построим падающие и отраженные лучи. Найдем углы падения и преломления через их тангенсы. $\alpha_{\text{пад}} = \arctg(\frac{h_1}{b_1})$, $\alpha_{\text{прел}} = \arctg(\frac{h_2}{b_2})$.

Из закона преломления $n_1 = \frac{\sin(\alpha_{\text{пад}})}{\sin(\alpha_{\text{прел}})}$

h1, см	b1, см	h2, см	b2, см	$\alpha_{\text{пад}}$	$\alpha_{\text{прел}}$	n_1
5,3	12	3,5	13	0,42	0,26	1,55
7,1	12	4,8	13	0,53	0,35	1,47

9,1	12	5,5	13	0,65	0,40	1,55
7,8	12	5,1	13	0,58	0,37	1,49
6,2	12	4,1	13	0,48	0,31	1,53
					Среднее	1,52

Среднее значение показателя преломления равно 1,52.

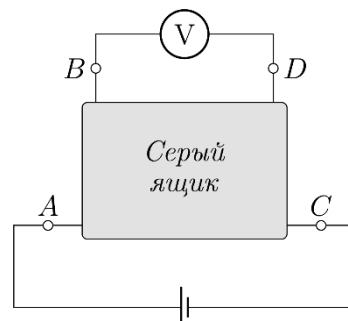
Исходя из полученного разброса показателей преломления можем оценить погрешность как 0,05.

Окончательно получим $n_1 = 1,52 \pm 0,05$.

Возможное решение

В первую очередь сопоставим положение переключателя и замыкаемые им контакты. Для этого измерим сопротивление участка BD омметром. Результат измерения при первом положении переключателя $r_1 = 1,1 \text{ Ом}$, в другом $r_2 = 27,3 \text{ Ом}$. Из этого можно сделать вывод, что первом положении замыкаются D и C, а во втором D и A. Обозначим первое положение переключателя «С», а другое – «А».

1. Соберем электрическую цепь (схема представлена на рисунке) для снятия ВАХ участка АВ в одном и в обратном (путем изменения полярности источника) направлениях. Прямым назовем направление, при котором «+» источника подключается к точке «А», обратным – к точке «В». Напряжение будем определять по вольтметру при положении переключателя «А» (на пределе 20 В), а силу тока через участок АВ будем вычислять по напряжению на резисторе, включенном между клеммами В и С, переводя для этого переключатель в положение «С» и переключив вольтметр на предел 200 мВ или 2В (при больших токах).



Полученные данные представлены в таблице.

ВАХ прямая (от А к С)

$U_{AB}, \text{В}$	$U_R, \text{мВ}$	$I, \text{мА}$
2,49	83,4	83
3,37	103,7	104
3,93	116,6	117
4,48	128,7	129
4,94	139	139
5,56	152,5	153
5,99	162,1	162
6,41	170,7	171
7,21	187,4	187
7,78	197,6	198
8,36	207	207
8,86	215	215
9,26	224	224
9,74	233	233
10,38	244	244

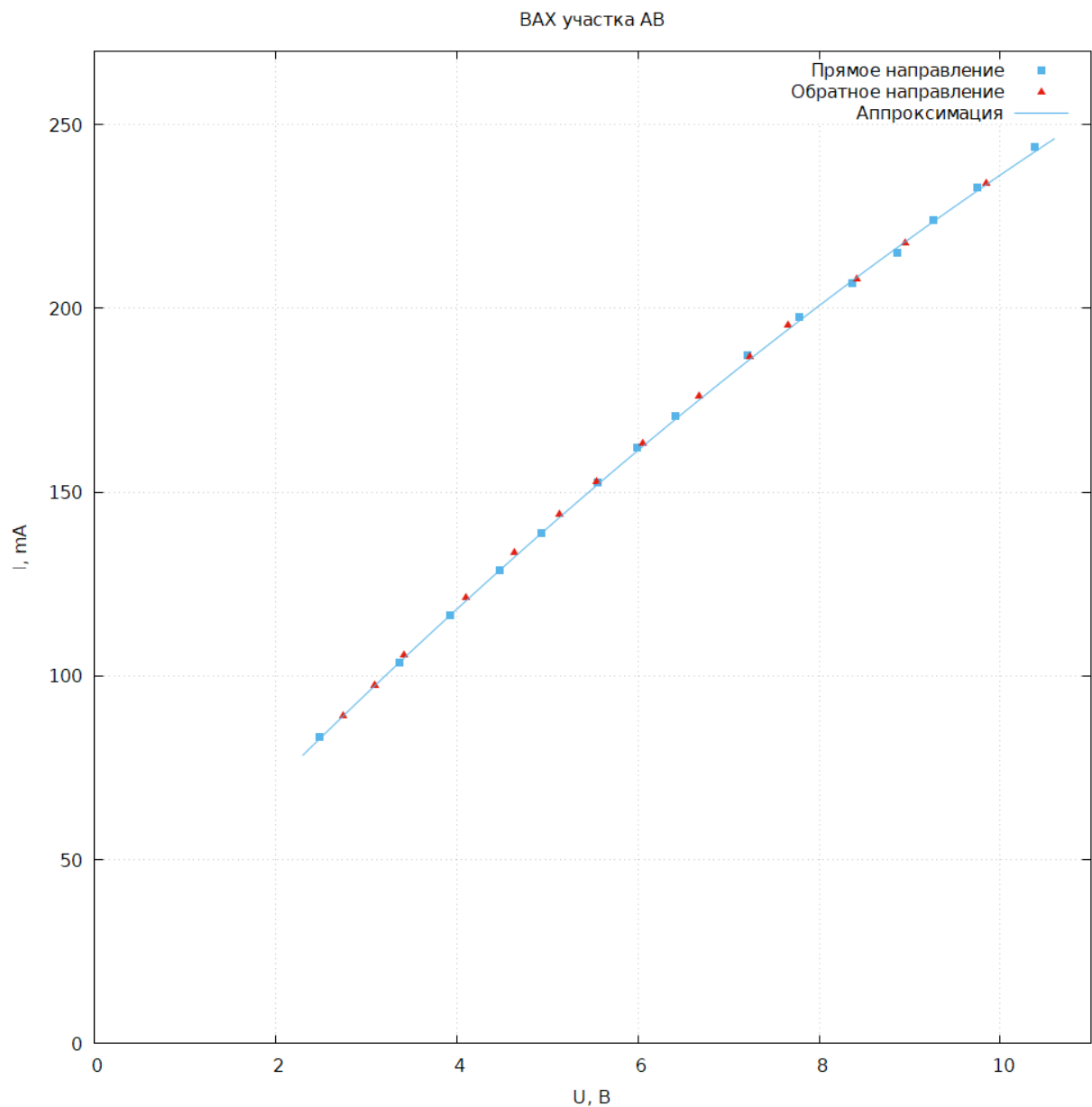
ВАХ обратная (от С к А)

$U_{AB}, \text{В}$	$U_R, \text{мВ}$	$I, \text{мА}$
2,75	89,2	89
3,09	97,6	98
3,42	105,7	106
3,09	97,6	98
4,10	121,3	121
4,64	133,7	134
5,13	144,1	144
5,54	152,9	153
6,05	163,5	164
6,67	176,3	176
7,23	187,1	187
7,66	195,4	195
8,42	208	208
8,95	218	218
9,85	234	234

Заметим, что при подключении источника «плюсом» к точке А и «минусом» к точке к С при малых напряжениях не горят ни лампочки ни светодиод, затем при увеличении напряжения яркость свечения ламп все время увеличивается, а яркость свечения диода сначала увеличивается, а затем обратно уменьшается до нуля. Также заметим, что при резком увеличении напряжения светодиод ненадолго ярко вспыхивает, а потом его яркость снижается. Яркости лампочек все время

примерно равные. При обратной полярности подключения источника поведение ламп остается таким же, а светодиод не загорается.

2. По полученным данным построим график ВАХ участка АВ.

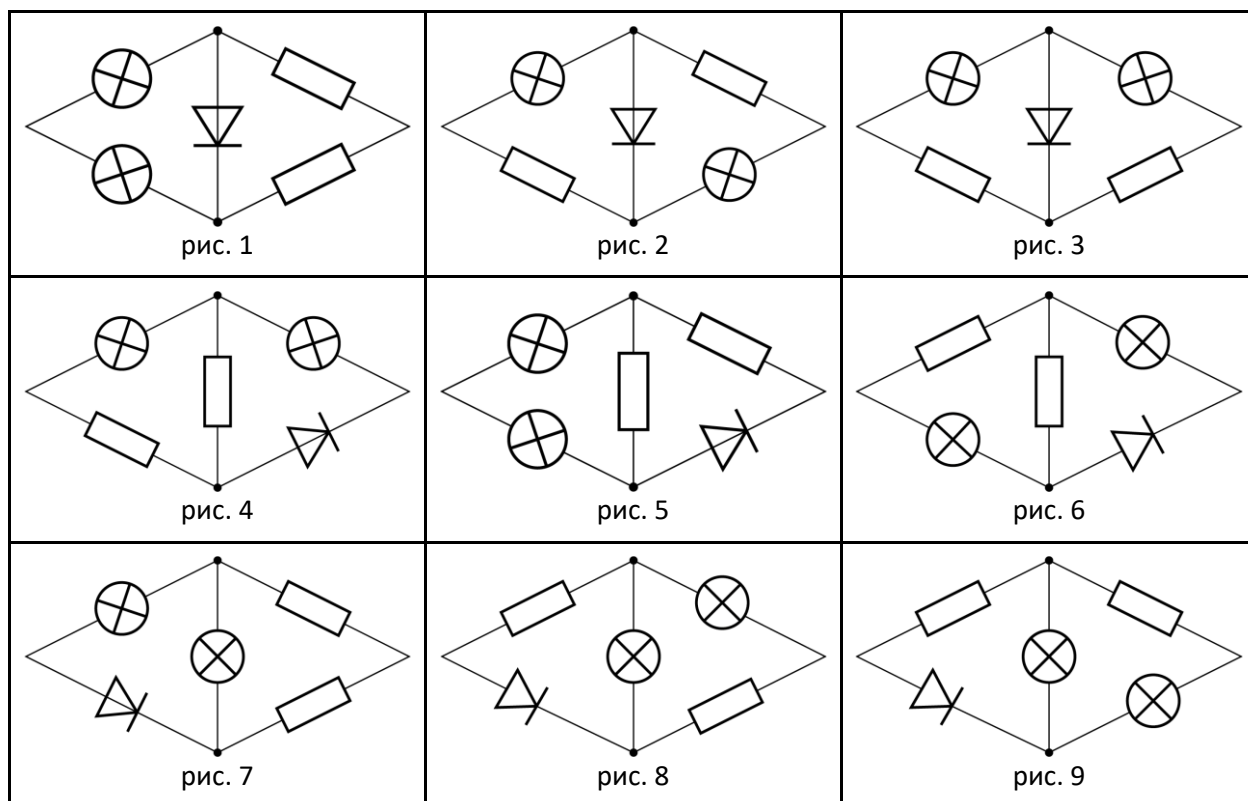


3. Определим схему расположения элементов.

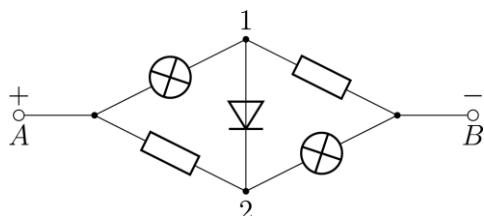
Заметим, что ВАХ в прямом направлении не отличается заметным образом от ВАХ в обратном направлении и при смене направления тока изменяется только поведение диода.

Лампочки всегда горят с примерно одинаковой яркостью, значит ток через них всегда примерно одинаковый.

При прямом подключении яркость светодиода сначала возрастает, а затем убывает. Значит при росте напряжения источника напряжение на диоде сначала растет, а затем начинает уменьшаться. Такое может происходить только из-за лампочек, которые обладают нелинейной ВАХ. Рассмотрим возможные схемы расположения элементов (пока не обращая внимания на полярность подключения диода).



В схемах 1 и 3 обеспечивается равный ток через лампочки, но в силу симметрии напряжение на диоде всегда будет нулевым и он никогда не загорится. В схемах 4 -9 не обеспечивается одинаковый ток через лампы при закрытом диоде. Остается схема 2, рассмотрим ее более подробно.

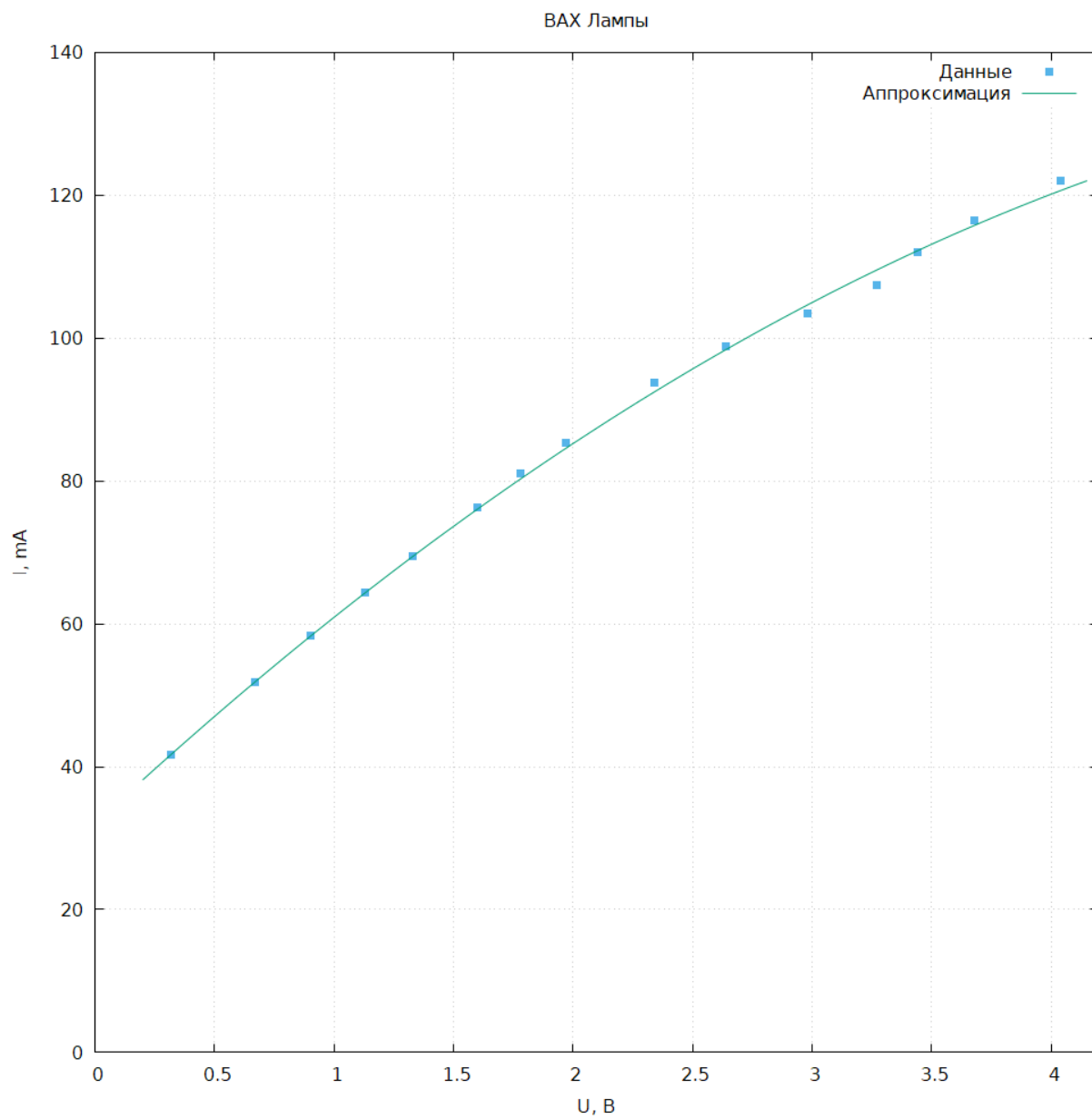


При увеличении тока в цепи спирали ламп начинают разогреваться и их сопротивление значительно возрастает. Если сопротивление ламп мало (лампы холодные), то потенциал точки 1 оказывается близок к потенциалу точки А, а потенциал точки 2 ближе к потенциалу точки В. При этом на диоде возникает напряжение U_D в прямом направлении, и отношение напряжения на диоде к напряжению на всей цепи $k = \frac{U_D}{U_{AB}}$ максимально. По мере нагрева ламп и роста их сопротивлений потенциалы точек 1 и 2 начинают приближаться к потенциалам точек В и А соответственно, что приводит к уменьшению напряжения на диоде относительно входного напряжения. (коэффициент k начинает уменьшаться). При малых U_{AB} диод не горит, так как мало общее напряжение и даже несмотря на то, что коэффициент k может быть близок к единице, напряжения на диоде не достаточно для его свечения. По мере роста U_{AB} растет и напряжение на диоде и он загорается. При дальнейшем увеличении U_{AB} диод гаснет, так как напряжение на нем уменьшается вследствие уменьшения коэффициента k . При изменении полярности подключения источника ток через диод не будет идти. Таким образом выбранная нами схема согласуется с наблюдаемыми эффектами, а другие возможные варианты ранее были отброшены.

Отметим, что если изменить направление диода на противоположное, то коэффициент k по мере роста U_{AB} также будет расти. Значит диод или всегда не будет гореть (зависит от соотношения сопротивлений резистора и лампы) или его яркость будет увеличиваться монотонно.

4. Построим график ВАХ лампы. Для этого воспользуемся ВАХ «серого ящика» при обратном подключении. В этом случае ток через диод не идет и в «сером ящике» получается две одинаковых параллельных ветви. Исходя из схемы $I_L = \frac{I_A}{2}$, $U_L = U_A - \frac{I_A}{2}r$, где $r = 52 \text{ Ом}$.

$U_{AB}, \text{ В}$	$U_R, \text{ мВ}$	$I, \text{ мА}$	$I_L, \text{ мА}$	$U_L, \text{ В}$
2,49	83,4	83	42	0,32
3,37	103,7	104	52	0,67
3,93	116,6	117	58	0,90
4,48	128,7	129	64	1,13
4,94	139	139	70	1,33
5,56	152,5	153	76	1,60
5,99	162,1	162	81	1,78
6,41	170,7	171	85	1,97
7,21	187,4	187	94	2,34
7,78	197,6	198	99	2,64
8,36	207	207	104	2,98
8,86	215	215	108	3,27
9,26	224	224	112	3,44
9,74	233	233	117	3,68
10,38	244	244	122	4,04



5. Из графика видно, что при номинальном напряжении на лампе $U_{\text{ном}} = 3,0 \text{ В}$, через нее течет ток $I_{\text{ном}} = 106 \text{ мА}$. Отсюда находим номинальную мощность $P_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{ном}} = 0,32 \text{ Вт}$.