**ОЛИМПИАДА ШКОЛЬНИКОВ «ПОКОРИ ВОРОБЬЕВЫ ГОРЫ» по ФИЗИКЕ**
**ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЙ (ФИНАЛЬНЫЙ) ЭТАП 2023 года, БИЛЕТ № 07 (11 классы)**

**Критерии оценивания:**

**Для вопросов:**

Есть отдельные правильные соображения – **1 балл.**

Ответ в целом правилен, но содержит существенные неточности, или существенно неполон, или отсутствует обоснование (для вопросов, в которых необходимо обоснование) – **2 балла.**

**Ответ** правилен, но присутствуют мелкие неточности, или ответ недостаточно полон, или отсутствует достаточное обоснование (для вопросов, в которых необходимо обоснование) – **3 балла.**

Ответ полностью правильный, но недостаточно обоснованный (для вопросов, в которых необходимо обоснование) – **4 балла.**

Правильный, полный и обоснованный ответ – **5 баллов (максимальная оценка).**

**Для задач:**

Есть отдельные правильные соображения – **1-2 балла.**

Есть часть необходимых для решения соображений, решение не закончено или содержит серьезные ошибки – **3-4 балла.**

Присутствует большая часть необходимых для решения соображений, правильно записана часть необходимых соотношений, решение не закончено или содержит ошибки – **5-7 баллов.**

Присутствуют все необходимые для решения соображения, правильно записаны почти все необходимые для решения исходные уравнения, но решение не закончено или содержит ошибки – **8-10 баллов.**

Присутствуют все необходимые для решения соображения, правильно записаны все необходимые для решения исходные уравнения, решение выстроено правильно с физической и логической точки зрения, но содержит ошибки – **11-14 баллов.**

Присутствуют все необходимые для решения соображения, правильно записаны все необходимые для решения исходные уравнения, решение выстроено правильно с физической и логической точки зрения, но содержит одну-две мелкие неточности, не позволившие получить правильный ответ, или правильное решение с недостаточным обоснованием существенных использованных результатов – **15-17 баллов.**

Правильное обоснованное решение с верным аналитическим ответом, но мелкой неточностью при получении численного ответа, либо правильное решение с правильными ответами с недостаточным обоснованием одного из использованных результатов (из числа не ключевых для решения, но необходимых) – **18-19 баллов.**

Полное, правильное, обоснованное решение с правильными ответами – **20 баллов (максимальная оценка).**

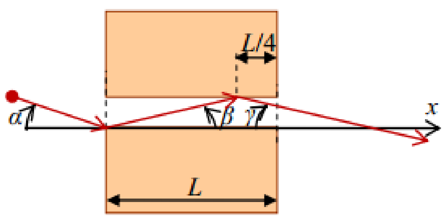
**Максимальная оценка за работу: 100 баллов.**

## УСЛОВИЯ, ВОЗМОЖНЫЕ РЕШЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАЧИСЛЯЕМЫХ БАЛЛОВ ДЛЯ ЗАДАЧ:

**Задание 1:**

Вопрос: Цилиндрическая однородная шайба, скользящая без вращения по гладкому горизонтальному льду, сталкивается с покоящимся гладким бруском. Будут ли вращаться шайба и брусок после удара? Ответ объяснить.

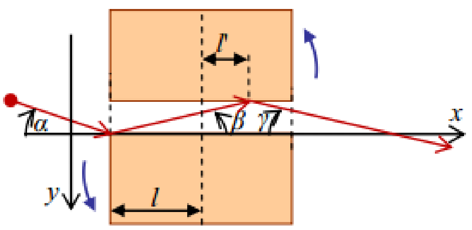
Задача: Два одинаковых гладких однородных бруска, имеющих форму прямоугольного параллелепипеда, лежат на гладкой горизонтальной поверхности строго «напротив» друг друга так, что их боковые грани параллельны. Масса каждого из брусков $M = 280$ г, их толщина (размер по вертикали) мала по сравнению с горизонтальными размерами. Маленькая однородная цилиндрическая шайба такой же высоты попадает в зазор между брусками (см. рисунок), скользя без



вращения по поверхности в направлении под углом $\alpha = 2{,}6°$ к соседним граням брусков (к оси $x$). Шайба ударяется о край одного бруска, отскакивает под углом $\beta = 2{,}2°$ к его поверхности, ударяется о второй брусок в точке, расположенной на расстоянии четверти длины брусков от другого края и успевает, не коснувшись более ни одного из брусков, вылететь из зазора под углом $\gamma = 2{,}0°$ к оси $x$. Найдите массу шайбы. Все соударения можно считать практически мгновенными и упругими.

**Ответ на вопрос**: Поскольку шайба и брусок гладкие, то в процессе удара они действуют друг на друга только силами нормальной реакции, так что линия удара (линия действия этих сил) проходит по радиусу шайбы и перпендикулярно боковой поверхности бруска. Так как шайба однородная, то ее центр масс совпадает с геометрическим центром, и поэтому линия удара обязательно проходит через него – удар для шайбы является центральным, момент внешней силы относительно центра масс равен нулю, и шайба не изменит состояния вращения – она после удара вращаться не будет. Для бруска ответ зависит от положения точки соударения на его боковой поверхности – если перпендикуляр к поверхности, проведенный из этой точки, проходит через проекцию центра масс бруска, то брусок тоже не будет вращаться после удара. В противном случае он обязательно начнет вращаться вокруг вертикальной оси. Можно также отметить, что в этих рассуждениях мы считали высоты шайбы и бруска почти одинаковыми, чтобы у сил их взаимодействия друг с другом и со льдом не возникло ненулевого момента, способного закрутить тела за время удара вокруг горизонтальной оси.

**Решение задачи**: Следует обратить внимание, что оба соударения являются *нецентральными*: линии действия сил упругости, возникающих при ударах (ясно, что они перпендикулярны поверхностям гладких брусков), не проходят через центры масс брусков. Поэтому бруски после ударов приводятся во вращение (а вот шайба нет – ее центр масс лежит на линии удара в обоих случаях). Закон сохранения энергии для первого удара записывается в виде $\dfrac{mv_0^2}{2} = \dfrac{mv^2}{2} + \dfrac{MV^2}{2} + E_{вр}$, где $m$ – масса шайбы, $v_0$ и $v$ – скорости шайбы до и после удара, $V$ – скорость центра масс бруска после столкновения. Энергия вращательного движения бруска $E_{вр}$ после удара зависит от набранной им угловой скорости (ясно, что $E_{вр} \propto \omega^2$), массы ($E_{вр} \propto M$) и размеров бруска. Отметим, что набор скорости центром масс бруска создается силой давления шайбы на брусок во время удара ($MV = F \cdot \delta t$), а набор угловой скорости обеспечивается моментом этой же силы, плечо которой $l = \dfrac{L}{2}$. Из этих соображений понятно, что $\omega \propto V \cdot l$, и поэтому $E_{вр} \propto Ml^2V^2$. Таким образом, можно прийти к заключению, что $E_{вр} = k \cdot \dfrac{l^2}{L^2} \cdot \dfrac{MV^2}{2}$, где $k$ – некоторый безразмерный коэффициент, зависящий от формы бруска. Итак, закон сохранения энергии для первого удара имеет вид: $\dfrac{mv_0^2}{2} = \dfrac{mv^2}{2} + \left(1 + \dfrac{k}{4}\right)\dfrac{MV^2}{2}$ (здесь учтено, что $l = \dfrac{L}{2}$).




Далее можно действовать обычным образом. Если записать закон сохранения импульса в проекциях на оси $x$ и $y$, то из них легко можно найти величины скоростей шайбы и бруска после удара:

$$\begin{cases} mv_0\cos(\alpha) = mv\cos(\beta) \\ mv_0\sin(\alpha) = MV - mv\sin(\beta) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} v = v_0\dfrac{\cos(\alpha)}{\cos(\beta)} \\ V = \dfrac{m}{M}v_0\left(\sin(\alpha) + \dfrac{\cos(\alpha)}{\cos(\beta)}\sin(\beta)\right) = \dfrac{m}{M}v_0\dfrac{\sin(\alpha+\beta)}{\cos(\beta)} \end{cases}.$$

Подставим эти выражения в закон сохранения энергии, в котором используем выражение для энергии вращения и разделим обе части на $\dfrac{mv_0^2}{2}$:

$$1 = \frac{\cos^2(\alpha)}{\cos^2(\beta)} + \left(1 + \frac{k}{4}\right)\frac{m}{M}\frac{\sin^2(\alpha+\beta)}{\cos^2(\beta)} \Rightarrow \left(1 + \frac{k}{4}\right)\frac{m}{M} = \frac{\cos^2(\beta) - \cos^2(\alpha)}{\sin^2(\alpha+\beta)} = \frac{\sin(\alpha-\beta)}{\sin(\alpha+\beta)}.$$

Для второго удара соотношения точно такие же, только изменяются углы и значение $l' = \frac{L}{4}$. Поэтому $\left(1+\frac{k}{16}\right)\frac{m}{M} = \frac{\sin(\beta-\gamma)}{\sin(\beta+\gamma)}$. Исключая из этих соотношений $k$, найдем:

$$m = \frac{M}{3}\cdot\left[4\frac{\sin(\beta-\gamma)}{\sin(\beta+\gamma)} - \frac{\sin(\alpha-\beta)}{\sin(\alpha+\beta)}\right] \approx \frac{M}{3}\cdot\left[4\frac{\beta-\gamma}{\beta+\gamma} - \frac{\alpha-\beta}{\alpha+\beta}\right] = 10\,\text{г}$$

(здесь учтена малость углов).

*Примечание*: Существует другой способ получить ключевое соотношение $E_{вр} = k\cdot\frac{l^2}{L^2}\cdot\frac{MV^2}{2}$ – доступный для тех, кто знаком с понятиями момента инерции и момента импульса. В этом случае достаточно просто отметить, что наряду с соотношением $MV = F\cdot\delta t$ есть также соотношение для момента импульса относительно центра масс $I\omega = Fl\cdot\delta t$, в котором $I$ – момент инерции бруска относительно оси, проходящей через центр масс. Поэтому $\omega = \frac{MVl}{I}$, и $E_{вр} = \frac{I\omega^2}{2} = \frac{Ml^2}{I}\cdot\frac{MV^2}{2}$. Как видно, на самом деле $k \equiv \frac{ML^2}{I}$.

**Ответ**: $m = \frac{M}{3}\cdot\left[4\frac{\sin(\beta-\gamma)}{\sin(\beta+\gamma)} - \frac{\sin(\alpha-\beta)}{\sin(\alpha+\beta)}\right] \approx \frac{M}{3}\cdot\left[4\frac{\beta-\gamma}{\beta+\gamma} - \frac{\alpha-\beta}{\alpha+\beta}\right] = 10\,\text{г}.$

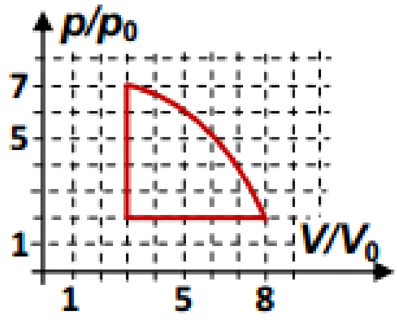
***Распределение баллов для задачи:***

| | | |
|---|---|---|
| **I** | Используется ЗСИ для $x$-проекции импульса шайбы | **1** |
| | В уравнениях ЗСЭ учитывается энергия вращения брусков | **3** |
| | В решении используется квадратичная связь энергии вращения с угловой скоростью | **2** |
| | В решении используется и обоснована линейная связь угловой скорости и $l$ | **4** |
| **II** | Правильно записана полная система уравнений, позволяющая получить ответ | **4** |
| | Получено правильное уравнение, связывающее отношение масс с углами | **2** |
| | Получена правильная формула для ответа | **2** |
| | В расчетах используется малость углов | **1** |
| | Получен правильный численный ответ | **1** |
| | **ВСЕГО** | **20** |

**Задание 2:**

Вопрос: Диаграмма процесса над постоянным количеством идеального газа в координатах давление-объем имеет вид параболы. При каких условиях теплоемкость газа в этом процессе постоянна? Чему может равняться постоянная молярная теплоемкость, если газ – двухатомный?

Задача: Рабочее тело тепловой машины – постоянное количество двухатомного идеального газа, а его цикл в координатах давление-объем состоит из двух отрезков прямых и участка параболы $p = \frac{p_0}{6}\left[36 + 5\frac{V}{V_0} - \left(\frac{V}{V_0}\right)^2\right]$. На каких участках цикла газ получает и отдает тепло? Найдите КПД цикла.




**Ответ на вопрос**: Процессы над постоянным количеством идеального газа с постоянной теплоемкостью – *политропические процессы* в координатах *p-V* описываются уравнением $pV^n = const$, где *показатель политропы* $n = \frac{c_p - c_\mu}{c_V - c_\mu}$. Здесь $c_V$ и $c_p$ – молярные теплоемкости газа в изохорном и изобарном процессах, а $c_\mu$ – в данном процессе. Диаграмма такого процесса является параболой при $n=-2$ ($c_\mu=\dfrac{c_p+2c_V}{3}$) и при $n=-0{,}5$ ($c_\mu=\dfrac{2c_p+c_V}{3}$). Для двухатомного идеального газа это соответствует $c_\mu=\dfrac{17}{6}R$ или $c_\mu=\dfrac{19}{6}R$.

**Решение задачи**: В первую очередь нужно определить, на каком из участков цикла газ получает и отдает тепло. Изохорное нагревание – процесс, когда тепло только подводится, а в изобарном сжатии – только отводится. Процесс, описываемый участком параболы, не относится ни к одному из двух случаев, разобранных в вопросе, так что это процесс с переменной теплоемкостью, и нам нужно определить ее знак. Для бесконечно малого участка этого процесса, в котором объем газа увеличивается на $dV$, изменение давления $dp=\dfrac{p_0}{6V_0}\left(5-2\dfrac{V}{V_0}\right)dV$. Количество теплоты, получаемое газом на этом участке

$$\delta Q=pdV+d\left(\frac{5}{2}pV\right)=\frac{7}{2}pdV+\frac{5}{2}Vdp=\frac{p_0}{12}\left[252+60\frac{V}{V_0}-17\left(\frac{V}{V_0}\right)^2\right]dV.$$

Нетрудно заметить, что $\delta Q=0$ при $V=6V_0$ – это точка изменения направления теплообмена К. Тепло подводится к рабочему телу в изохорном процессе 1-2 и на параболическом участке 2-К слева от К ($6V_0,5p_0$): $Q_H=Q_{12}+Q_{2K}$. Ясно, что $Q_{12}=\dfrac{5}{2}(p_2V_2-p_1V_1)=\dfrac{75}{2}p_0V_0$, а $Q_{2K}=A_{2K}+\dfrac{5}{2}(p_KV_K-p_2V_2)=A_{2K}+\dfrac{45}{2}p_0V_0$. Вычислим работу:

$$A_{2K}=\int_{3V_0}^{6V_0}p(V)dV=\frac{p_0V_0}{6}\int_3^6(36+5x-x^2)dx=\frac{75}{4}p_0V_0\Rightarrow Q_H=\frac{315}{4}p_0V_0.$$

Полная работа рабочего тела в цикле

$$A=\int_{3V_0}^{8V_0}p(V)dV-2p_0\cdot 5V_0=\frac{p_0V_0}{6}\int_3^8(36+5x-x^2)dx-10p_0V_0=\frac{575}{36}p_0V_0\Rightarrow\eta=\frac{A}{Q_H}=\frac{115}{567}\approx 0{,}203.$$

**Ответ**: Газ получает тепло в изохорном процессе и на параболическом участке слева от К ($6V_0,5p_0$), отдает тепло на параболическом участке справа от К и в изобарном процессе; КПД цикла $\eta=\dfrac{115}{567}\approx 20\%$.

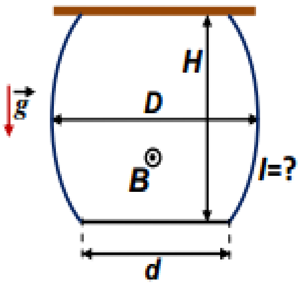
***Распределение баллов для задачи:***

| | | |
|---|---|---|
| I | Указано, что на параболическом участке есть точка изменения направления теплообмена | **3** |
| | Верно определены участки, где РТ получает и отдает тепло | **4** |
| | Работа на параболическом участке вычисляется через правильно записанный интеграл | **3** |
| II | Правильно вычислены две из трех величин: работа в цикле, количество теплоты нагревателя и количество теплоты холодильника (в единицах $p_0V_0$) | **4+4=8** |
| | Получен правильный численный ответ для КПД | **2** |
| | **ВСЕГО** | **20** |

**Задание 3:**

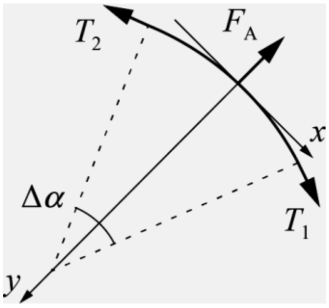
Вопрос: Легкий гибкий провод находится на гладкой горизонтальной поверхности и закреплен своими концами в фиксированных точках. Закрепление шарнирное – оно позволяет проводу уходить в любом горизонтальном направлении. В пространстве создано однородное постоянное вертикальное магнитное поле, а по проводу течет ток. Внешнее поле намного больше, чем поле, создаваемое этим током. Какую форму примет провод? Ответ обосновать.

Задача: Два одинаковых отрезка тонкого легкого гибкого провода прикрепили концами к потолку. На других концах подвесили (за края) тонкий металлический стержень длины $d$ = 0,8 м с массой $m$ = 800 г.




Расстояние между точками подвеса проводов к потолку точно равно длине стержня. Когда в пространстве, в котором находилась система, создали однородное постоянное горизонтальное магнитное поле с индукцией $B$ = 3,5 Тл, и на верхние концы проводов подали постоянное напряжение, провода приняли вид, показанный на рисунке. При этом расстояние между потолком и стержнем стало равно H = 1 м, а наибольшее расстояние между проводами (см. рисунок) D = 1 м. Найдите величину силы тока, текущего по проводам. Магнитное поле, созданное токами в проводах, намного слабее внешнего. Ускорение свободного падения $g \approx 9{,}8$ м/с$^2$.

**Ответ на вопрос**: Рассмотрим равновесие бесконечно малого участка провода, имеющего радиус кривизны $R$ и угловой размер $\Delta\alpha$. Запишем условия равновесия в проекциях на оси $x$ (проходит по касательной к проводу в середине участка) и $y$ (проходит через центр кривизны участка). Учтём, что сила Ампера $F_A = IB\Delta l = IBR\Delta\alpha$:




$$\begin{cases} T_1\cos(\Delta\alpha/2) = T_2\cos(\Delta\alpha/2); \\ T_1\sin(\Delta\alpha/2) + T_2\sin(\Delta\alpha/2) = IBR\Delta\alpha. \end{cases}$$

Из первого уравнения следует, что натяжение провода постоянно: $T_1 = T_2 \equiv T$, из второго (с учётом малости $\Delta\alpha$) – что радиус кривизны постоянен на участках провода, на которые не действуют другие силы (кроме сил Ампера и натяжения): $R = T/(IB) = \mathrm{const}$. Значит, эти участки – дуги окружностей. Итак: провод – дуга окружности, соединяющая точки закрепления.

**Решение задачи**: В соответствии с ответом на вопрос ясно, что, если пренебречь действующей на провода силой тяжести, то оба отрезка провода – это дуги окружности. С учетом равенства длины стержня и расстояния между точками подвеса понятно, а также симметрии нагрузки (одинаковость сил натяжения означает одинаковость радиусов кривизны) что эти дуги симметричны относительно горизонтальной линии, проходящей через точки максимального удаления проводов. Значит, если обозначить угол отклонения проводов от вертикали в точках прикрепления к стержню $\beta$, то угловой размер каждого провода (как дуги окружности) равен $2\beta$. Следовательно:

$$\left\{\begin{matrix} H = 2R\cdot\sin(\beta) \\ D-d = 2R\cdot[1-\cos(\beta)] \end{matrix}\right\} \Rightarrow \begin{cases} 4R^2 = H^2 + [2R-(D-d)]^2 \Rightarrow R = \dfrac{H^2+(D-d)^2}{4(D-d)} = 1{,}3\text{ м} \\ \sin(\beta) = \dfrac{2H(D-d)}{H^2+(D-d)^2} = \dfrac{5}{13},\ \cos(\beta) = \dfrac{H^2-(D-d)^2}{H^2+(D-d)^2} = \dfrac{12}{13} \end{cases}.$$

Условие равновесия стержня $2T\cos(\beta) = mg + IBd$ с учетом того, что $T = IRR$, позволяет найти ответ на вопрос задачи:

$$IB[2R\cos(\beta) - d] = mg \Rightarrow I = \frac{2mg(D-d)}{B[H^2+d^2-D^2]} = 1{,}4\text{ А}.$$

**Ответ**: $I = \dfrac{2mg(D-d)}{B[H^2+d^2-D^2]} = 1{,}4$ А.

***Распределение баллов для задачи:***

| | | |
|---|---|---|
| I | Указано (используется в решении), что оба отрезка провода – это дуги окружности | **2** |
| | В решении используется правильная формула для связи радиуса кривизны проводов с силой натяжения | **3** |
| | Обосновано, что провода симметричны относительно горизонтальной линии, проходящей через точки их максимального удаления | **3*** |
| | В решении используется условие равновесия стержня, в записи которого присутствуют все силы (две силы натяжения нити, сила тяжести и сила Ампера) с правильно описанными величинами и направлениями | **2** |

| | | |
|---|---|---|
| **II** | Правильно найден (аналитически либо численно) радиус кривизны проводов | **3** |
| | Правильно найден (через любую тригонометрическую функцию) угол наклона проводов в точке прикрепления к стержню | **2** |
| | Получено правильное уравнение , из которого можно найти силу тока | **2** |
| | Получен правильный аналитический ответ | **2** |
| | Получен правильный численный ответ | **1** |
| | **ВСЕГО** | **20** |

*Если это утверждение используется в решении без обоснования, за этот пункт ставится 1 балл

**Задание 4:**

Вопрос: Тонкая нить лампы длиной 4 мм расположена на расстоянии 90 см от экрана, параллельного нити. Найдите оптическую силу тонкой линзы, с помощью которой на этом экране можно получить четкое изображение нити длиной 8 мм. Ответ запишите с учетом знака.

Задача: Небольшой источник света находится на главной оси системы из двух одинаковых тонких линз, расположенных на расстоянии $L_1 = 20$ см друг от друга. Система создает изображение предмета с поперечным увеличением $\Gamma_1 = -0{,}4$ (знак «–» указывает на то, что изображение перевернутое, увеличение прямых изображений будем считать положительным). Когда, не трогая источник и ближайшую к нему линзу, другую отодвинули так, что расстояние между линзами увеличилось до $L_2 = 40$ см, поперечное увеличение изображения стало равным $\Gamma_2 = -0{,}5$. Каким станет поперечное увеличение, если еще сдвинуть дальнюю линзу, чтобы расстояние между линзами стало равным $L_3 = 80$ см? Какова оптическая сила каждой линзы?

**Ответ на вопрос**: Поскольку изображение нужно получать на экране, то изображение должно быть действительным, а линза – собирающей. При этом изображение увеличенное (отношение расстояний $b$ (от линзы до экрана) и $a$ (от нити до линзы) равно $\frac{b}{a} = |\Gamma| = 2$. Их сумма равна 90 см, то есть $a = 30$ см и $b = 60$ см. По формуле линзы $D = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} = +5$ дптр.

**Решение задачи**: В системе из двух линз изображение источника, сформированное первой, является «источником» для второй. Пусть $a$ – расстояние от источника до первой линзы, $D$ – одинаковая оптическая сила линз. Тогда расстояние от первой линзы до изображения источника в ней определяется из формулы линзы: $D = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \Rightarrow b = \frac{a}{Da-1}$. Поперечное увеличение этого изображения с учетом знака $\Gamma = -\frac{b}{a} = \frac{1}{1-Da}$. Расстояние от этого изображения до второй линзы $a' = L - b = \frac{DaL - L - a}{Da-1}$. Следовательно, $b' = \frac{a'}{Da'-1} = a'\frac{Da-1}{(Da-1)DL - 2Da + 1}$ и $\Gamma' = -\frac{b'}{a'} = \frac{1-Da}{1-2Da-(1-Da)DL}$. Таким образом, увеличение системы двух одинаковых тонких линз как функция расстояния между линзами при неизменном положении источника относительно первой линзы описывается выражением $\Gamma(L) = \Gamma\Gamma' = \frac{1}{1-2Da-(1-Da)DL}$, или $\frac{1}{\Gamma(L)} = 1 - 2Da - (1-Da)DL \equiv \alpha L + \beta$ – обратное увеличение есть линейная функция этого расстояния.

По двум заданным точкам находим коэффициенты этой зависимости:

$$\begin{cases} \frac{1}{\Gamma_1} = \alpha L_1 + \beta \\ \frac{1}{\Gamma_2} = \alpha L_2 + \beta \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \alpha = \frac{\Gamma_1 - \Gamma_2}{\Gamma_1\Gamma_2(L_2 - L_1)} = +2{,}5 \text{ дптр} \\ \beta = \frac{\Gamma_2 L_2 - \Gamma_1 L_1}{\Gamma_1\Gamma_2(L_2 - L_1)} = -3 \end{cases}.$$

Подставляя третье значение, получаем:

$$\Gamma_3 = \frac{\Gamma_1\Gamma_2(L_2 - L_1)}{(\Gamma_1 - \Gamma_2)L_3 + \Gamma_2 L_2 - \Gamma_1 L_1} = -1.$$

С связи коэффициентов с параметрами системы $\alpha = (Da - 1)D$ и $\beta = 1 - 2Da$ находим, что $Da = 2$ и $D = \alpha = +2{,}5$ дптр.

**Ответ**: $\Gamma_3 = \dfrac{\Gamma_1\Gamma_2(L_2 - L_1)}{(\Gamma_1 - \Gamma_2)L_3 + \Gamma_2 L_2 - \Gamma_1 L_1} = -1$, $D = \dfrac{2(\Gamma_1 - \Gamma_2)}{\Gamma_1 L_1 - \Gamma_2 L_2 - \Gamma_1\Gamma_2(L_2 - L_1)} = +2{,}5$ дптр.

***Распределение баллов для задачи***:

| | | |
|---|---|---|
| **I** | В решении используется принцип последовательного построения изображений | **2** |
| | Указано и обосновано, что линзы системы - собирающие | **1+2=3** |
| | В решении используется, что результирующее увеличение находится как произведение увеличений последовательно созданных изображений | **3** |
| | В решении проводится исследование зависимости результирующего увеличения от расстояния между линзами | **2** |
| **II** | Получена правильная формула для $\Gamma(L)$ | **2** |
| | Правильно определены обе «недостающие» константы этой зависимости | **2+2=4** |
| | Получен правильный аналитический ответ для $\Gamma_3$ | **1** |
| | Получен правильный численный ответ для $\Gamma_3$ | **1** |
| | Получен правильный аналитический ответ для $D$ | **1** |
| | Получен правильный численный ответ для $D$ | **1** |
| | **ВСЕГО** | **20** |