

Санкт-Петербургский государственный университет

В.В.Монахов, С.А.Курашова, А.В.Кожедуб, А.П.Горбенко, А.А.Штундер

**Разбор избранных заданий
Интернет-олимпиады школьников по физике 2023/2024 учебного года**

Санкт-Петербург

2024 г.

УДК 373.5:53.05

ББК 74.262.23

Рецензент: доктор физ.-мат. наук, профессор С.Л.Яковлев.

Печатается по решению кафедры вычислительной физики физического факультета СПбГУ.

В.В.Монахов, С.А.Курашова, А.В.Кожедуб, А.П.Горбенко, А.А.Штундер.

Разбор избранных заданий Интернет-олимпиады школьников по физике 2023/2024 учебного года: Учебно-методическое пособие. – СПб: СПбГУ, 2024. – 24 с.: ил.

Учебно-методическое пособие предназначено для учащихся средней школы из 7–11 классов. В нём разбирается решение задач и порядок выполнения виртуальных физических экспериментов, предлагавшихся ученикам 7–11 классов на отборочных и заключительном туре олимпиады 2023/2024 учебного года. Также может быть использовано учителями физики, студентами-физиками, изучающими предмет «Педагогика», и студентами педагогических вузов для подготовки школьников к олимпиадам по физике.

УДК 373.5:53.05

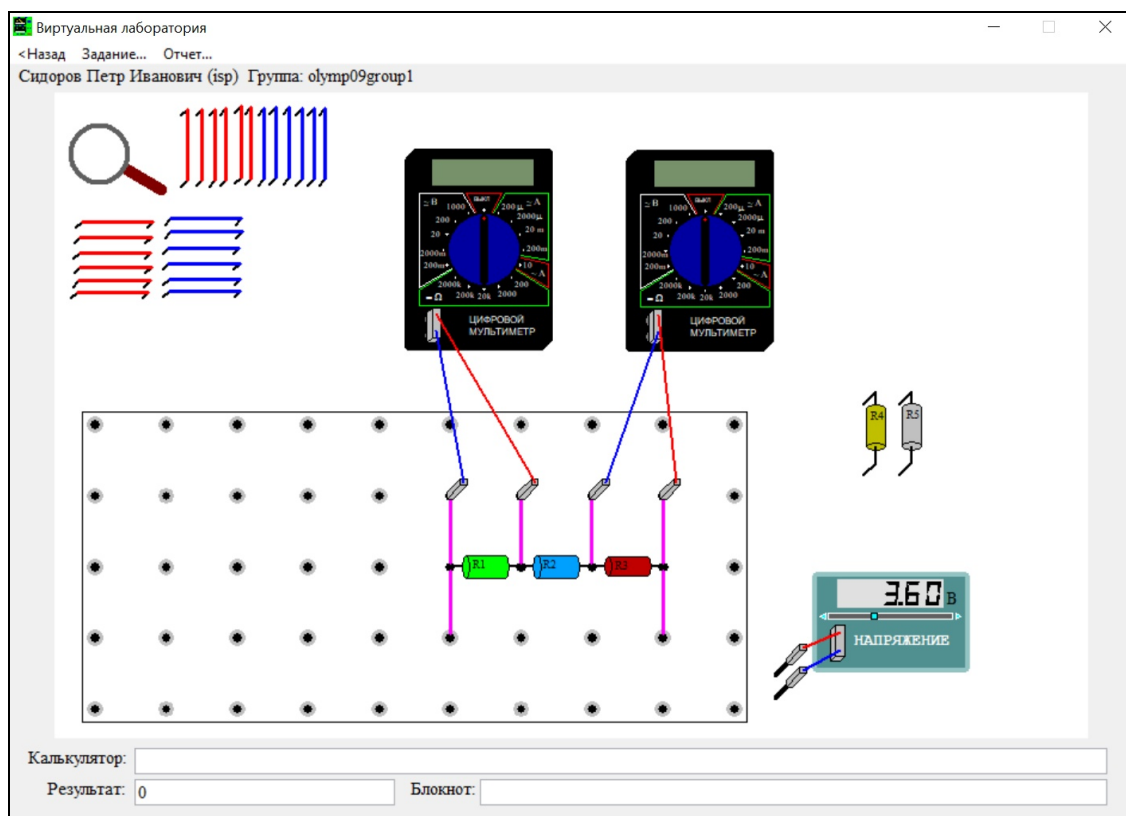
ББК 74.262.23

© В.В.Монахов, С.А.Курашова, А.В.Кожедуб, А.П.Горбенко, А.А.Штундер, 2024

Оглавление

1. Тур 1. 9-10 классы. Модель: Параметры резисторов и токи (25 баллов)	4
1.1. Измерение сопротивления R2	5
1.2. Измерение сопротивлений R1 и R3.....	7
1.3. Нахождение токов I_{\max} и I_2	9
2. Тур 1. 7-8 классы. Задача: Хитроумные купцы (20 баллов).....	12
3. Тур 1. 7-8 классы. Задача: Байдарки и каноэ (25 баллов)	13
4. Тур 1. 11 класс. Задача: Переправа (15 баллов).....	15
5. Тур 3. 11 класс. Модель: Масс-спектрограф (20 баллов)	17
5.1 Получение трека частицы первого типа	19
5.2 Получение треков частиц второго и третьего типа и нахождение значений z	21
5.3 Нахождение радиуса трека, скорости и массы частицы	22
5.4 Нахождение ускоряющего потенциала	24
5.5 Нахождение массы частицы в единицах энергии	24

1. Тур 1. 9-10 классы. Модель: Параметры резисторов и токи (25 баллов)



Имеется система с впаянными в наборную панель резисторами R1, R2, R3 и двумя мультиметрами, резисторы R4 и R5, которые могут быть установлены на эту панель, а также соединительные провода и источник питания, позволяющий менять движком напряжение на его выходе. Мультиметры могут работать в режиме (микро/милли)амперметров и (милли)вольтметров. Сопротивление мультиметра в режиме (милли)вольтметра можно считать бесконечно большим, в режиме (микро/милли)амперметра - пренебрежимо малым. Определите с минимально возможной погрешностью (желательно, не более 0.1%):

- Сопротивление R1 первого резистора.
- Сопротивление R2 второго резистора.
- Сопротивление R3 третьего резистора.
- Максимальный ток I_{\max} без короткого замыкания, который при использовании элементов данной системы можно пропустить через источник питания.
- Ток I_2 , который при этом будет протекать через резистор R2.

Соберите для этого необходимые электрические схемы, проведите измерения и выполните расчеты. Добивайтесь максимальной точности измерений!

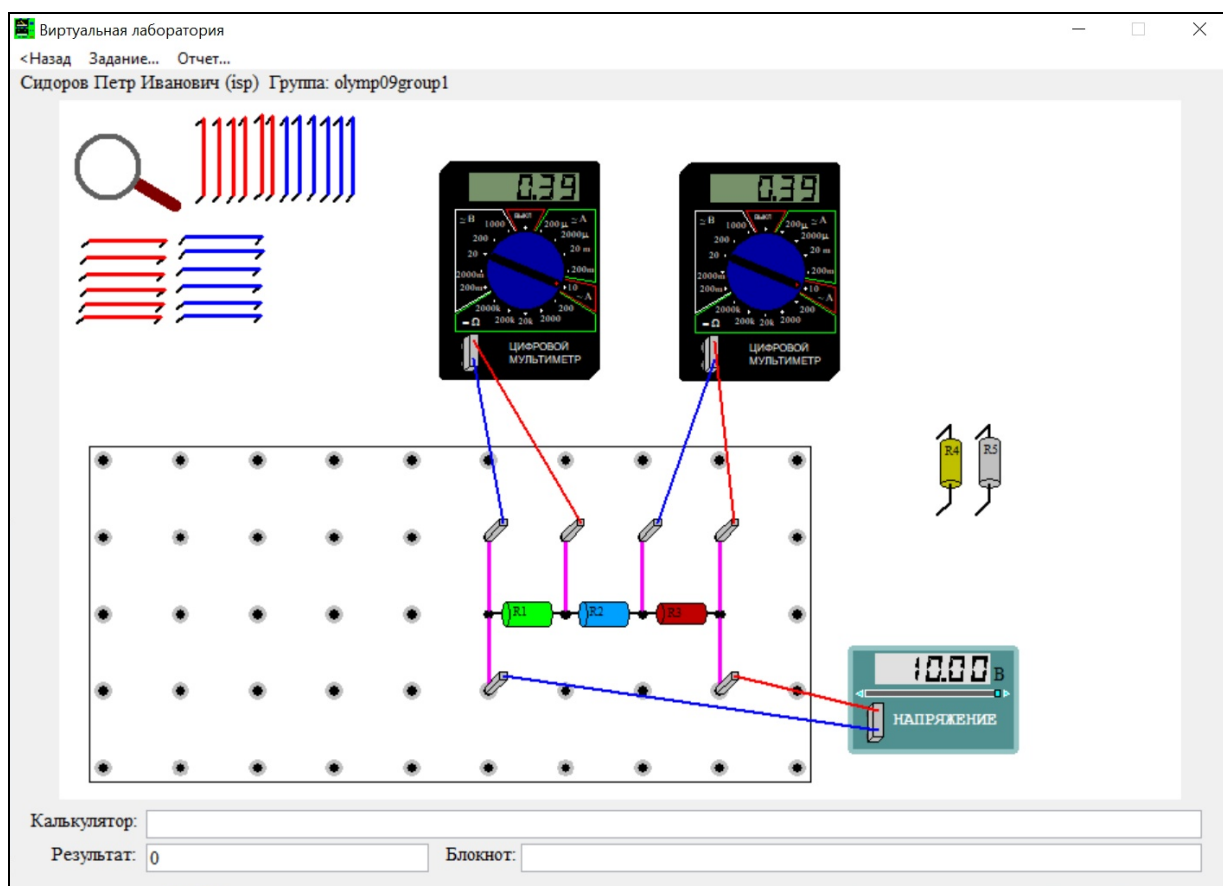
Задания можно переделывать, но за каждую повторную отсылку результатов на сервер начисляется до 5 штрафных баллов.

Буква μ у диапазона означает "микро", буква m - "милли". Напряжение на выходе источника регулируется перемещением его движка. Элементы можно перетаскивать мышью и подключать к клеммам панели. Провода имеют практически нулевое сопротивление, их можно растягивать для подсоединения к нужным клеммам. Тип измеряемой величины и предел измерительной шкалы мультиметра меняется с помощью поворота ручки.

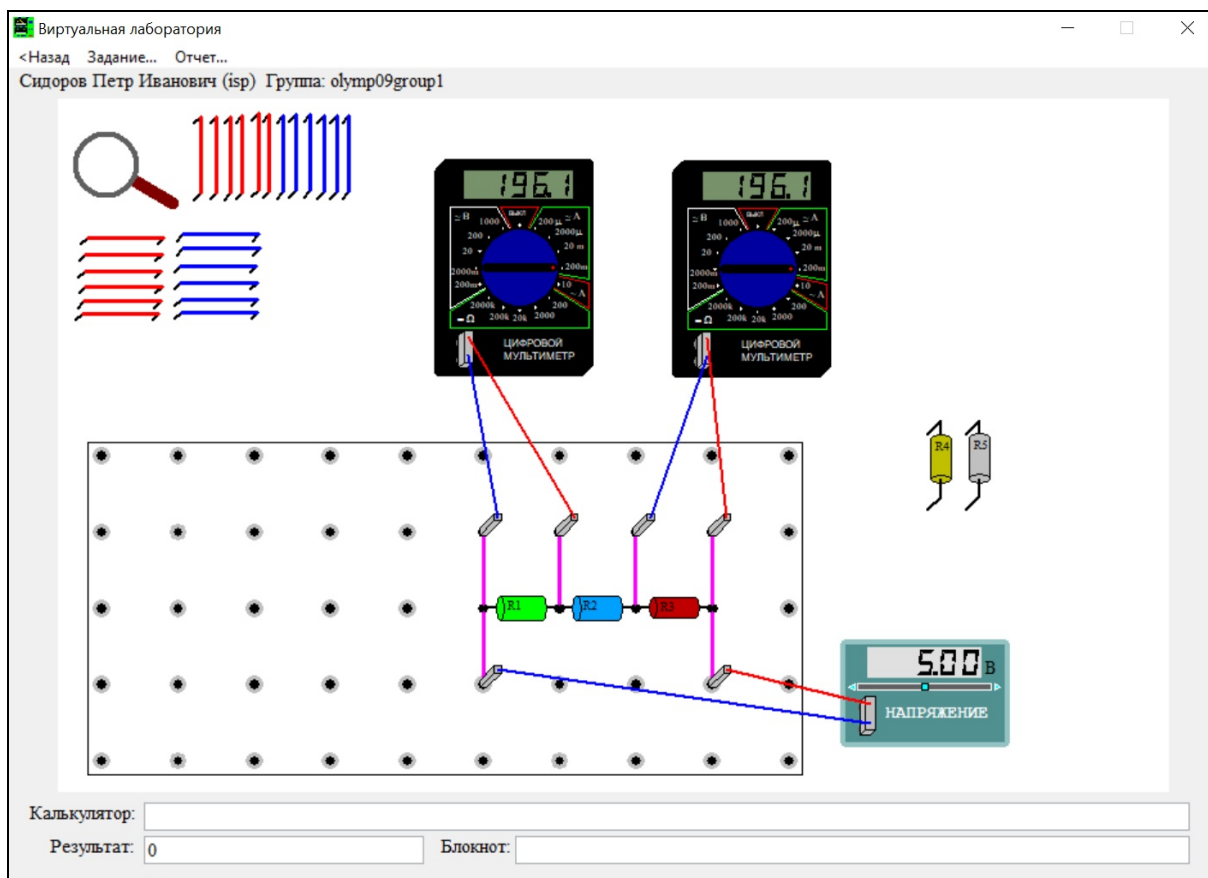
Решение.

1.1. Измерение сопротивления R2

Поскольку в режиме (милли)амперметра сопротивление мультиметров пренебрежимо мало, с их помощью можно зашунтировать резисторы R1 и R3, благодаря чему всё напряжение (обозначим его V_2) будет падать на резисторе R2, а мультиметры будут показывать идущий через него ток (обозначим его J_2). Первоначально установим максимальное напряжение на источнике напряжения.



В этом режиме мультиметры показывают для подходящего диапазона тока 10 А две значащие цифры тока. Это мало для необходимой точности измерений, поэтому мы уменьшим напряжение источника так, чтобы можно было переключиться на диапазон тока 200 мА. Подходящим оказывается, например, напряжение $V_2=5.00$ В, при нем протекающий через резистор R2 ток оказывается равен $J_2=196.1$ мА – см. следующий рисунок.



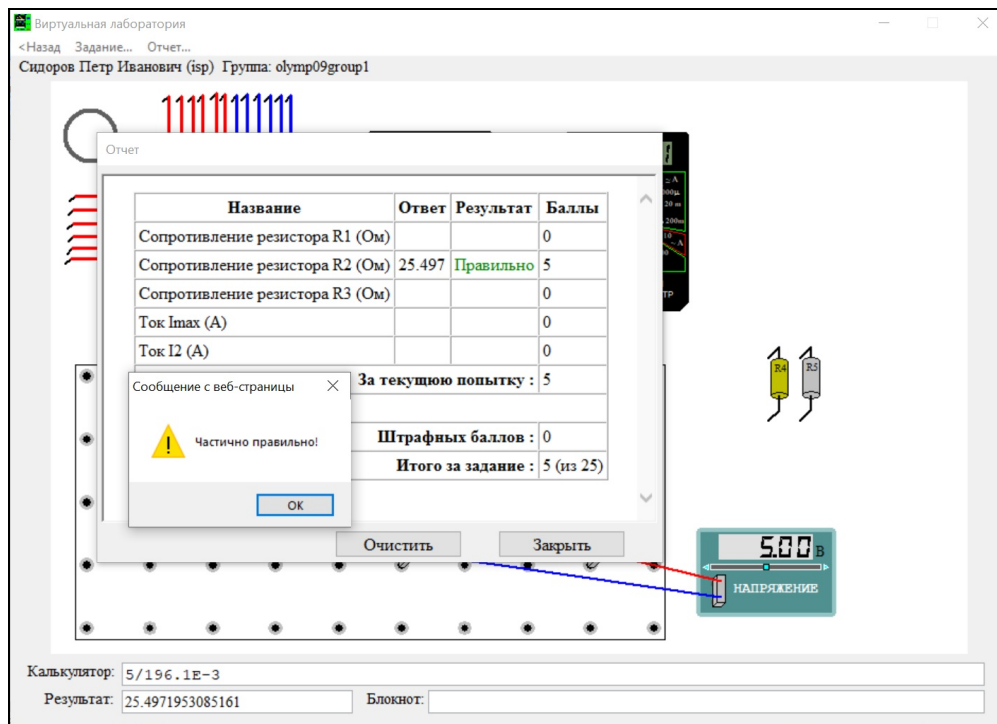
Таким образом,

$$R_2 = \frac{V_2}{J_2} = \frac{5.00 \text{ В}}{196.1 \text{ мА}} = 25.497 \text{ Ом.} \quad (1)$$

Часто участники стараются сначала выполнить первый пункт задания, и во многих заданиях вопросы подобраны так, что именно первые пункты задания самые простые. Однако это не всегда так, как, например, в рассматриваемом случае. Следует начинать с выполнения тех частей заданий, для которых понятно, как получить ответ.

Кроме того, в предыдущие годы и во время проведения отборочных туров этого учебного года необходимо было отсылать ответы сразу за все части задания, иначе не заполненные поля ответов засчитывались как неверные ответы. По просьбе участников олимпиады начиная с заключительного тура олимпиады 2023/2024 учебного года система начисления штрафных баллов и в заданиях на основе моделей, и в теоретических задачах изменена: штрафные баллы за незаполненные поля первоначально не начисляются. А после того, как в какое-то поле введен правильный ответ и отослан на сервер, это поле при последующих ответах можно не заполнять, зачтенный ответ будет продолжать считаться зачтенным. Такая система стимулирует исправление участником совершенных ошибок и выстраивания цепочки поэтапного решения сложных проблем. Именно такие умения необходимы будущим исследователям и инженерам.

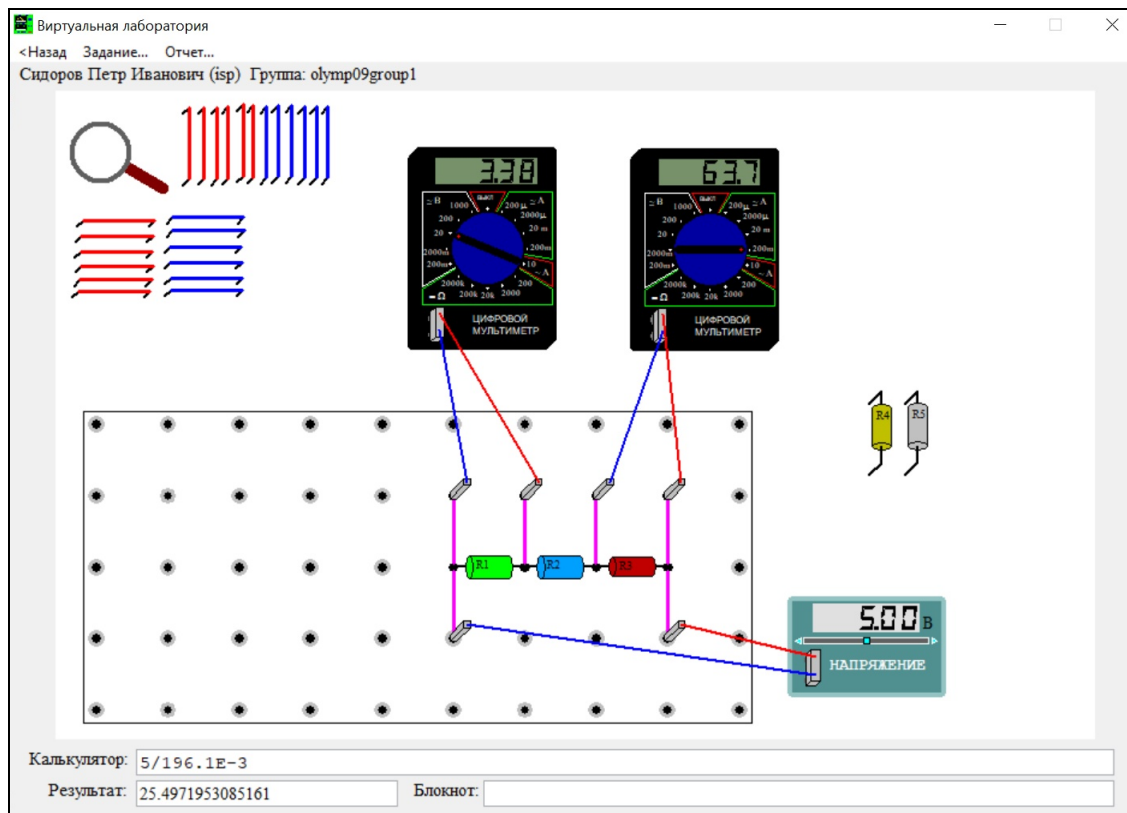
В связи со сказанным отсылаем результаты на сервер.



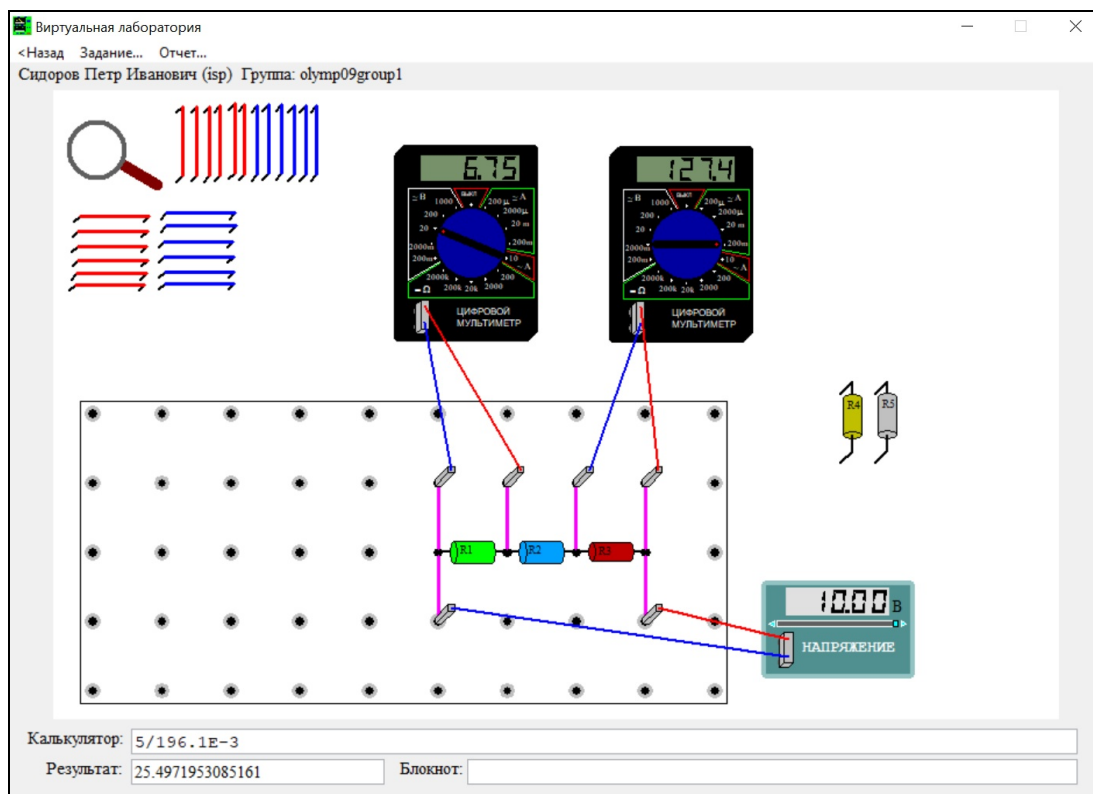
Для ввода последующих ответов необходимо нажать кнопку **ОК** и затем кнопку **Закреть**. Когда необходимо будет заново вводить ответы, надо будет опять открыть отчет, нажать кнопку **Очистить** и заново вводить ответы.

1.2. Измерение сопротивлений R1 и R3

Для нахождения сопротивления R1 необходимо отключить закорачивающий его контакты миллиамперметр. Это делается переключением мультиметра в режим вольтметра.



Можно было бы измерить ток через получившуюся цепочку резисторов R1+R2, найти ее сопротивление и вычесть из результата R2. Однако обратим внимание на то, что правый мультиметр показывает ток, протекающий через последовательно включенные резисторы R1 и R2 (через резистор R3 ток не течет из-за нулевого сопротивления миллиамперметра), а левый – показывает напряжение на резисторе R1. Поэтому можно сразу найти сопротивления R1 как отношение напряжения на нем V_1 к току J_1 через него. Однако показываемые вольтметром и миллиамперметром цифры далеки от верхней границы диапазонов измерения, поэтому можно увеличить напряжение на выходе источника напряжения.



Получаем

$$R1 = \frac{V_1}{J_1} = \frac{6.75 \text{ В}}{127.4 \text{ мА}} = 52.983 \text{ Ом.}$$

Отсылаем на сервер и получаем

Отчет

Название	Ответ	Результат	Баллы
Сопротивление резистора R1 (Ом)	52.983	Правильно	5
Сопротивление резистора R2 (Ом)	25.497	Правильно	5
Сопротивление резистора R3 (Ом)			0
Ток I _{max} (A)			0
Ток I ₂ (A)			0

Сообщение с веб-страницы

Частично правильно!

За текущую попытку : 10

Штрафных баллов : 0

Итого за задание : 10 (из 25)

Очистить Закрыть

Значение R3 находится аналогично, с помощью переключения левого мультиметра в режим миллиамперметра, а правого – в режим вольтметра. Получаем

$$R3 = \frac{V_3}{J_3} = \frac{6.25}{147.1E-3} \frac{В}{А} = 42.488 \text{ Ом.}$$

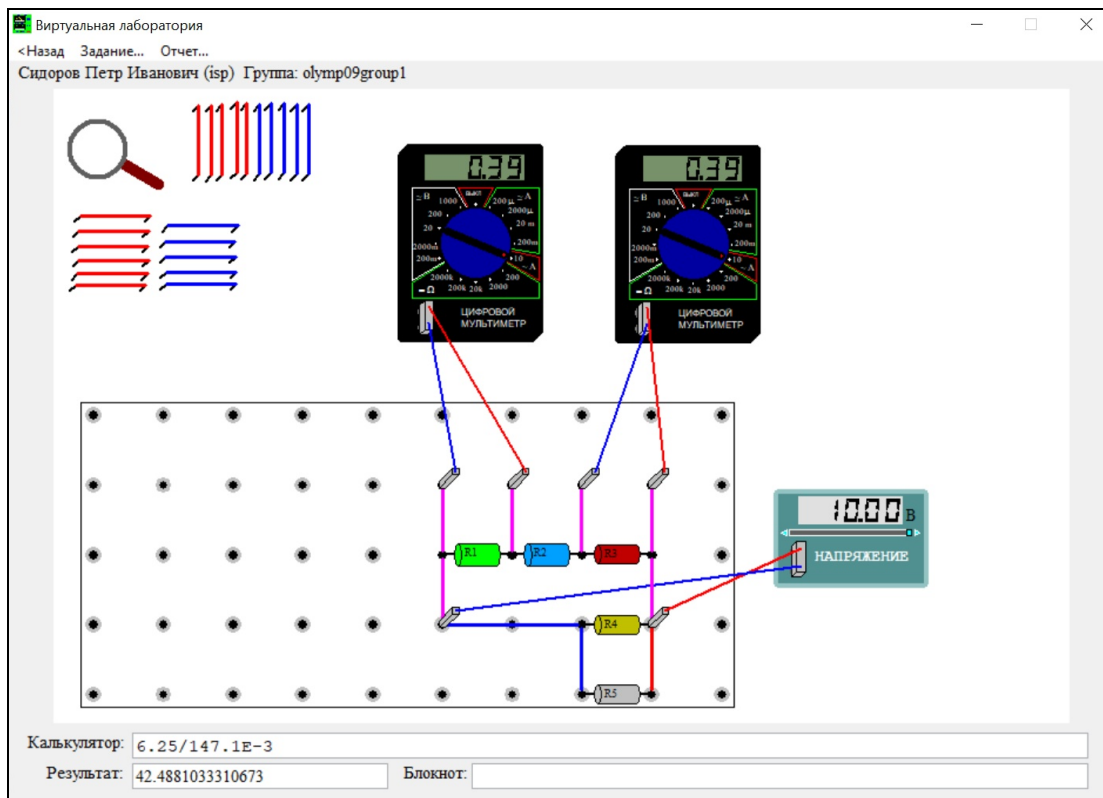
1.3. Нахождение токов I_{max} и I_2

Ответ на следующий вопрос (найти максимальный ток I_{max} без короткого замыкания, который при использовании элементов данной системы можно пропустить через источник питания) очевиден:

$$I_{max} = \frac{E_{max}}{R_{min}}, \quad (2)$$

где $E_{max}=10 \text{ В}$ – максимальное напряжение источника напряжения, а R_{min} – минимальное ненулевое сопротивление, которое мы можем получить в нашей схеме.

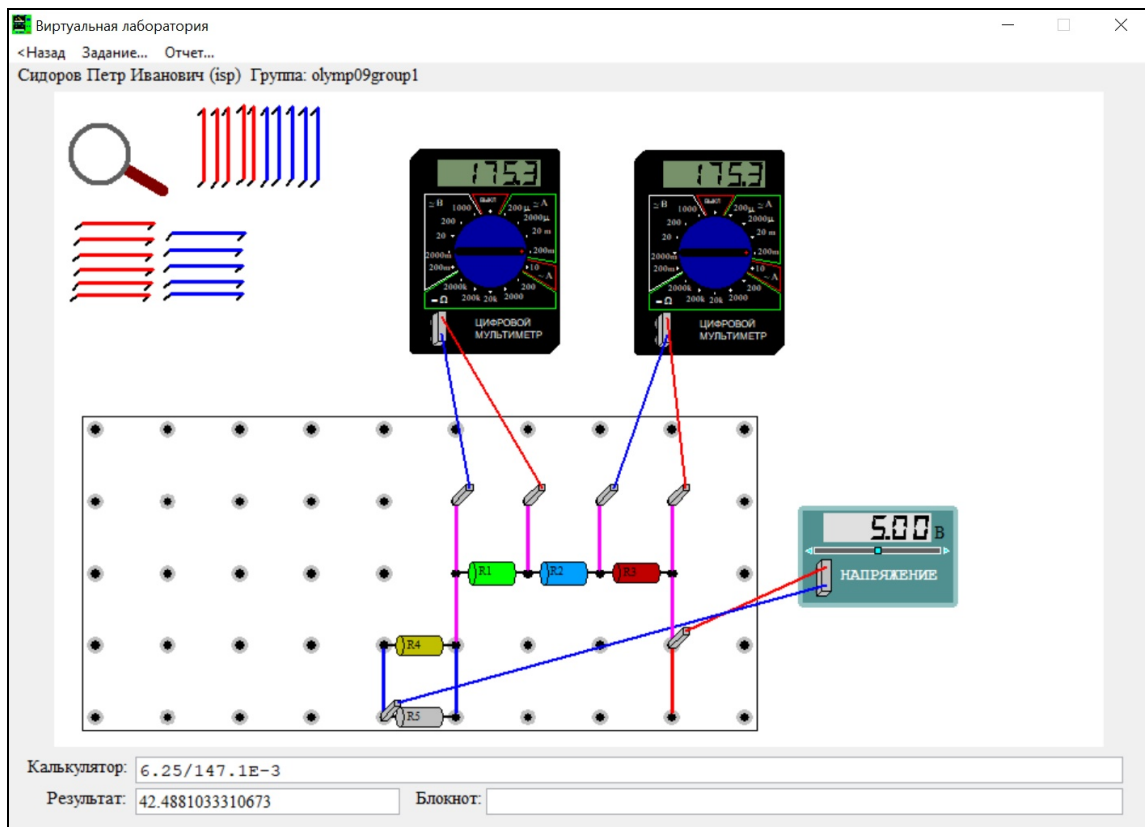
Для нахождения ответа сначала требуется выяснить, какие элементы имеющейся схемы можно передвигать, и к каким клеммам можно подсоединять провода и резисторы R4 и R5. Оказывается, передвигать можно только штырьки на конце проводов от источника напряжения, и подсоединяться только к тем клеммам, к которым они первоначально присоединены. Схема с минимальным сопротивлением получается при параллельном соединении резисторов. Резисторы R4 и R5 легко соединить параллельно, и к ним можно подсоединить параллельно цепочку резисторов R1, R2 и R3. Для минимизации сопротивления этой цепочки резисторы R1 и R3 можно зашунтировать миллиамперметрами, имеющими нулевое сопротивление. Такая цепочка будет иметь сопротивление R2. Поэтому параллельно будут включены резисторы R2, R4 и R5.



Сопротивление такой цепочки будет

$$R_{\min} = \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5}} = \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_{45}}}, \quad (3)$$

где R_{45} это сопротивление параллельно включенных резисторов R_4 и R_5 . Мы можем измерить сопротивление $R_{45}+R_2$ параллельно включенных резисторов R_4 и R_5 , соединенных последовательно с R_2 .



Получаем

$$R_{45} + R_2 = \frac{5}{175.3 \cdot 10^{-3}} \text{ В} = 28.522 \text{ Ом} . \quad (4)$$

Из (1) и (4) следует

$$R_{45} = (R_{45} + R_2) - R_2 = 28.522 - 25.497 \text{ Ом} = 3.025 \text{ Ом} . \quad (5)$$

Из (1), (3) и (5) получаем

$$R_{\min} = \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_{45}}} = \frac{1}{\frac{1}{25.497} + \frac{1}{3.025}} \text{ Ом} = 2.704 \text{ Ом} . \quad (6)$$

Из (2) и (6) следует

$$I_{\max} = \frac{E_{\max}}{R_{\min}} = \frac{10}{2.704} \text{ А} = 3.698 \text{ А} . \quad (7)$$

При этом ток I_2 будет равен

$$I_2 = \frac{E_{\max}}{R_2} = \frac{10}{25.497} \text{ А} = 0.392 \text{ А} . \quad (7)$$

Отсылаем результаты на сервер.

Отчет

Название	Ответ	Результат	Баллы
Сопrotивление резистора R1 (Ом)	52.983	Правильно	5
Сопrotивление резистора R2 (Ом)	25.497	Правильно	5
Сопrotивление резистора R3 (Ом)	42.488	Правильно	5
Ток I _{max} (А)	3.698	Правильно	5
Ток I ₂ (А)	0.392	Правильно	5
За текущую попытку :			25
Штрафных баллов :			0
Итого за задание :			25 (из 25)

Сообщение с веб-страницы

Молодец, Петр, правильно!

ОК

Очистить Закрyть

2. Тур 1. 7-8 классы. Задача: Хитроумные купцы (20 баллов)

В 13-14 веке в Новгороде мерой для измерения тканей был локоть (54 см) и ладонь, которая составляла шестую часть локтя. Один купец предложил другому отрез заморской материи в 115 ладоней, товарищ согласился её купить, но, измерив, заявил, что длина отреза составляла ровно 18 локтей. За доброй чашей мёда купцы решили не ссориться и усреднили свои измерения. Однако, продавец оказался хитрее, так как обманул товарища на 13.5 см. Определите:

1. Какую длину (L) в сантиметрах на самом деле имел отрез ткани.
2. Какой длины была мера в локоть (L1), которую использовал покупатель.
3. На сколько процентов (K) мера в ладонь, которую использовал продавец, была меньше правильной.
4. Какой процент (N) от длины отреза составила ошибка этой его первоначальной попытки измерения.

Ответы вводите с точностью не хуже, чем до одного процента.

Введите ответ:

$$L = \boxed{990} \text{ см}$$

$$L1 = \boxed{55} \text{ см}$$

$$K = \boxed{4.35} \text{ процентов}$$

$$N = \boxed{4.55} \text{ процентов}$$

Решение.

1. Продавец оценил длину отреза в 115 ладоней, а покупатель – в 18 локтей. Среднее значение оказалось на 13.5 см больше истинного. Учитывая, что настоящая длина ладони составляет 9 см, вычисляем длину отреза:

$$L = (115 + 18 \cdot 6) / 2 \cdot 9 - 13.5 = 990 \text{ см.}$$

2. Покупатель оценил эту длину в 18 локтей, поэтому длина меры в локоть, которую он использовал,

$$L_1 = 990 / 18 \text{ см} = 55 \text{ см.}$$

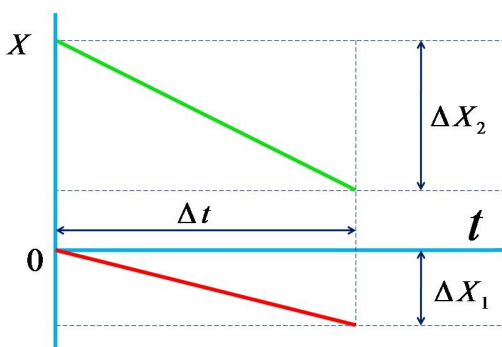
3. Определим, на сколько процентов мера в ладонь, которую использовал продавец, была меньше правильной

$$K = \frac{9 - \frac{990}{115}}{9} \cdot 100\% = 4.35\%.$$

4. Относительная ошибка выполненного продавцом измерения

$$N = \frac{115 \cdot 9 - 990}{990} \cdot 100\% = 4.55\%.$$

3. Тур 1. 7-8 классы. Задача: Байдарки и каноэ (25 баллов)



Команды гребцов тренируются на озере. Маршрут проложен по прямой. В момент начала отсчёта времени две байдарки (красная и синяя) стартуют от причала и движутся в одном направлении со скоростями V_1 и V_2 относительно воды, соответственно. На рисунке красной линией показан участок графика зависимости координаты красной байдарки от времени в системе

отсчёта, связанной с синей. Спустя $T = 13.4$ мин после старта байдарка, идущая впереди, встречает каноэ, движущееся навстречу со скоростью $2V_1$ относительно воды. На рисунке зелёной линией показан участок графика зависимости координаты каноэ от времени в системе отсчёта, связанной с синей байдаркой. $\Delta X_1 = 235.2$ м, $\Delta X_2 = 1848$ м, $\Delta t = 5.6$ мин. Определите:

1. Скорость каноэ относительно воды (V).
2. На каком расстоянии (S) находилось каноэ от байдарок в момент их старта.
3. Сколько времени Δt_1 потребовалось каноэ, чтобы преодолеть расстояние между байдарками.
4. После встречи с байдарками каноэ продолжает движение до места их старта, разворачивается и догоняет байдарки. Определите, сколько времени прошло от первой встречи каноэ с красной байдаркой до второй (Δt_{11}).
5. Сколько времени потребовалось каноэ, чтобы преодолеть расстояние между байдарками во второй раз (Δt_2).

Ответы вводите с точностью не хуже, чем до одного процента. Введите ответ:

$$V = \boxed{3.2} \text{ м/с}$$

$$S = \boxed{4420} \text{ м}$$

$$\Delta t_1 = \boxed{1.95} \text{ мин}$$

$$\Delta t_{11} = \boxed{30.7} \text{ мин}$$

$$\Delta t_2 = \boxed{35.8} \text{ мин}$$

Решение.

1. Байдарки движутся в положительном направлении оси X . Поскольку координата красной байдарки относительно синей уменьшается со временем, скорость синей байдарки больше.

$$V_2 - V_1 = \frac{\Delta X_1}{\Delta t} = \frac{235.2}{5.6 \cdot 60} = 0.7 \text{ м/с} . \quad (1)$$

Каное движется навстречу байдаркам со скоростью $2V_1$, поэтому

$$V_2 + 2V_1 = \frac{\Delta X_2}{\Delta t} = \frac{1848}{5.6 \cdot 60} = 5.5 \text{ м/с} . \quad (2)$$

Из (1) и (2) определяем скорости байдарок:

$$V_1 = \frac{5.5 - 0.7}{3} = 1.6 \text{ м/с} . \quad (3)$$

$$V_2 = \frac{5.5 + 2 \cdot 0.7}{3} = 2.3 \text{ м/с} . \quad (4)$$

Скорость каное относительно воды

$$V = 2V_1 = 3.2 \text{ м/с} . \quad (5)$$

2. Двигаясь навстречу друг другу, каное и синяя байдарка прошли расстояние S за время T .

$$S = (V_2 + 2V_1) T = 4422 \text{ м} . \quad (6)$$

3. К моменту, когда каное поравнялось с синей байдаркой, красная отстала на $(V_2 - V_1)T$. Скорость сближения красной байдарки и каное составляет $(V_1 + 2V_1) = 3V_1$. Каное пройдёт между байдарками за

$$\Delta t_1 = \frac{(V_2 - V_1)T}{3V_1} = 1.95 \text{ мин} . \quad (7)$$

4. После встречи с красной байдаркой каное должно дважды преодолеть расстояние, которое красная байдарка прошла от причала с момента старта, и пройти то расстояние, которое красная байдарка пройдёт с момента первой встречи до второй:

$$2V_1 (T + \Delta t_1) + V_1 \Delta t_{11} = 2V_1 \Delta t_{11} . \quad (8)$$

Из (8) следует, что от первой встречи каное с красной байдаркой до второй пройдёт

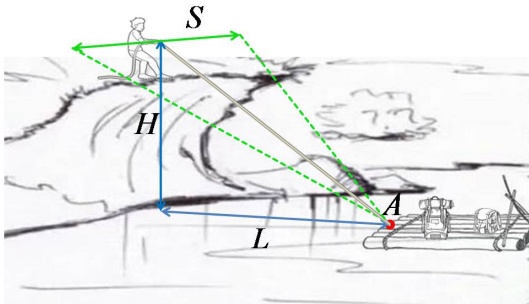
$$\Delta t_{11} = 2T + 2\Delta t_1 = 30.7 \text{ мин} . \quad (9)$$

5. К моменту, когда каное, развернувшись у причала, нагонит красную байдарку, с момента старта пройдёт $T + \Delta t_1 + \Delta t_{11} = 3T + \Delta t_1$ минут.

За это время синяя байдарка обгонит красную на $(V_2 - V_1)/(3T + 3\Delta t_1)$ метров. Нагоняя синюю байдарку со скоростью $2V_1 - V_2$, каное преодолет это расстояние за

$$\Delta t_{22} = \frac{(V_2 - V_1)(3T + 3\Delta t_1)}{2V_1 - V_2} = 35.8 \text{ мин.} \quad (10)$$

4. Тур 1. 11 класс. Задача: Переправа (15 баллов)



Турист переправляет рюкзаки на плоту через небольшое озеро. Стоя на обрыве, он держит верёвку на высоте $H=3.5$ м над водой и равномерно выбирает её со скоростью $U=0.44$ м/с. При этом плот в некоторый момент времени движется со скоростью $V=0.774$ м/с.

Определите:

1. На каком расстоянии от берега (L) в этот момент находится ближайший край плота (точка А).
2. С какой скоростью (V_1) будет двигаться плот, когда расстояние до берега уменьшится в 2 раза.
3. С какой скоростью (V_2) мог бы двигаться плот в начальном положении, если бы, выбирая верёвки со скоростью $U=0.44$ м/с, его тянули два человека, стоящие на расстоянии $S=5.8$ м друг от друга. На рисунке положение верёвок в этом случае показано зелёным пунктиром.

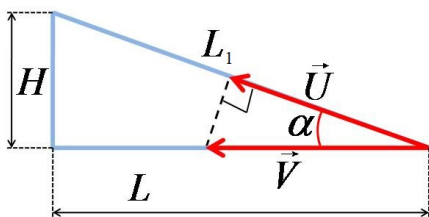
Ответы вводите с точностью не хуже, чем до одного процента. Введите ответ:

$$L = \boxed{2.42} \text{ м}$$

$$V_1 = \boxed{1.35} \text{ м/с}$$

$$V_2 = \boxed{0.94} \text{ м/с}$$

Решение.



1. Скорость U , с которой турист выбирает верёвку, связана с изменением длины L_1 в зависимости от изменения длины L . Эта связь задается уравнением

$$(L_1)^2 = L^2 + H^2. \quad (1)$$

Продифференцировав уравнение (1), получаем

$$2L_1 dL_1 = 2L dL. \quad (2)$$

Разделив (2) на $2dt$, получаем

$$L_1 \frac{dL_1}{dt} = L \frac{dL}{dt}. \quad (3)$$

С учетом того, что $U = \frac{dL_1}{dt}$, $V = \frac{dL}{dt}$ и $\frac{L}{L_1} = \cos(\alpha)$, из (3) следует

$$U = V \cos(\alpha). \quad (4)$$

Расстояние L от плота до берега

$$L = H \operatorname{ctg}(\alpha). \quad (5)$$

Из (4) и (5) находим

$$L = \frac{HU}{V\sqrt{1-\frac{U^2}{V^2}}} = 2.42 \text{ м}. \quad (3)$$

2. Если расстояние от плота до берега уменьшится в два раза, косинус угла между вектором скорости плота \vec{V}_1 и скоростью верёвки \vec{U} будет равен

$$\cos(\alpha_1) = \frac{L/2}{L_1} = \frac{L/2}{\sqrt{(L/2)^2 + H^2}}, \quad (4)$$

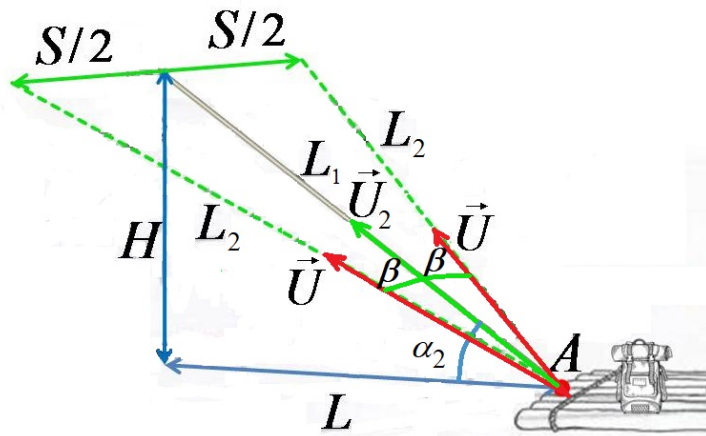
и, аналогично (1),

$$\cos(\alpha_1) = \frac{U}{V_1}. \quad (5)$$

Из (4) и (5) находим, что скорость плота в этом случае окажется равной

$$V_1 = \frac{U}{\cos(\alpha_1)} = \frac{U\sqrt{(L/2)^2 + H^2}}{L/2} = 1.35 \text{ м/с}. \quad (6)$$

3. Если плот, находящийся на расстоянии L от берега будут тащить два туриста, стоящие на расстоянии S друг от друга, ситуация будет описываться следующим рисунком:



Скорости U_2 и U определяются изменением длин L_1 и L_2 , связанных уравнением

$$(L_2)^2 = (L_1)^2 + (S/2)^2. \quad (7)$$

Продифференцировав уравнение (7), получаем

$$2L_2 dL_2 = 2L_1 dL_1. \quad (8)$$

Разделив (8) на $2dt$, получаем

$$L_2 \frac{dL_2}{dt} = L_1 \frac{dL_1}{dt}. \quad (9)$$

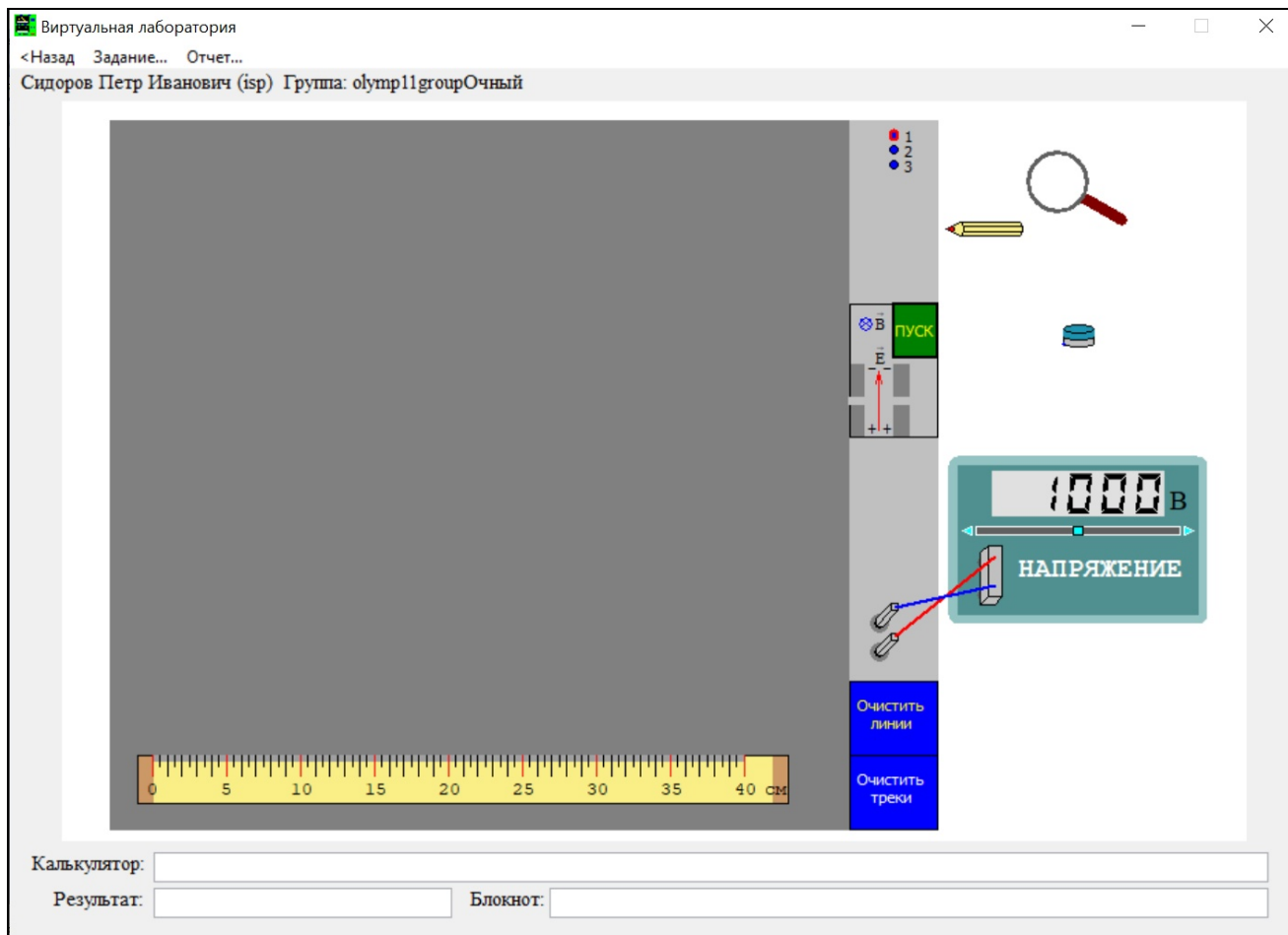
С учетом того, что в данном случае $U = \frac{dL_2}{dt}$, $U_2 = \frac{dL_1}{dt}$ и $\frac{L_1}{L_2} = \cos(\beta)$, из (9) следует

$$U_2 = \frac{U}{\cos(\beta)} = U \frac{L_2}{L_1}. \quad (10)$$

Из (10) следует, что плот будет двигаться со скоростью

$$V_2 = \frac{U_2}{\cos(\alpha_2)} = \frac{U L_2 / L_1}{L / L_1} = \frac{U L_2}{L} = \frac{U\sqrt{L^2 + (S/2)^2 + H^2}}{L} = 0.94 \text{ м/с}. \quad (11)$$

5. Тур 3. 11 класс. Модель: Масс-спектрограф (20 баллов)



В масс-спектрографе имеется источник ионизированных частиц одного типа. Частицы можно по одной запускать нажатием на кнопку "Пуск" или изменением напряжения V на высоковольтном источнике напряжения. Степень ионизации получаемых частиц лежит в диапазоне от +1 до +4 и переключается (с неизвестным порядком и значением) выбором кнопок 1, 2, 3 в правом верхнем углу камеры.

Вся система находится в однородном магнитном поле $B=0.1$ Тесла, направление поля перпендикулярно траектории частицы, оно показано около кнопки "Пуск". После запуска первоначально нейтральная частица, имеющая скорость, которую можно считать нулевой, ионизируется, после чего ускоряется продольным электрическим полем от этой области, имеющей нулевой потенциал, до потенциала U .

Затем заряженная частица пролетает между пластинами конденсатора, расстояние между которыми $d = 1$ см, на которые подано напряжение V с регулируемого источника напряжения. Направление напряженности E этого поперечного электрического поля показана красной стрелкой.

Если сила, создаваемая этим полем, компенсирует силу, создаваемую магнитным полем, заряженная частица пролетает сквозь отверстие, и в камере появляется трек от частицы. Если не компенсирует, частица ударяется в стенку, и наблюдается вспышка выше или ниже выходного отверстия - в зависимости от того, куда попала частица. Найдите чему равны:

- скорость v однократно ионизированной частицы;

- массу M частицы (в килограммах). Ответ вводить в научной нотации. Например, $1,56 \cdot 10^{-25}$ в научной нотации записывается как 1.56E-25;
- массу m частицы (в МэВ/ C^2 , где C - скорость света);
- потенциал U .

Ответы вводите с точностью не хуже чем до десятой процента.

Напряжение V регулируется движком или нажатиями на голубые треугольники по бокам от него. Элементарный заряд $q_0 = 1.6022 \cdot 10^{-19}$ Кл, скорость света $C = 299\,792$ км/с. Электрон-Вольт (эВ) - энергия, необходимая для переноса элементарного заряда в электростатическом поле между точками с разницей потенциалов в 1 В.

Задание возможно переделывать, но за повторные попытки начисляется до 4 штрафных баллов.

Решение.

5.1 Уравнения, описывающих поведение заряженных частиц в масс-спектрографе.

Для частицы зарядом q , массой M и скоростью v , движущейся перпендикулярно вектору индукции магнитного поля величиной B , сила центростремительного ускорения равна силе, вызванной магнитным полем, и выполняется соотношение

$$\frac{M v^2}{R} = qvB. \quad (1)$$

Для того чтобы частица пролетела в отверстие в масс-спектрографе, сила, вызванная магнитным полем, должна быть уравновешена силой электрического поля напряженностью E .

$$qvB = qE = q \frac{V}{d}, \quad (2)$$

где по условию $d = 1$ см, а напряжение V мы находим по напряжению источника питания, при котором появляется трек частицы. Из (2) получаем формулу для нахождения скорости частицы.

$$v = \frac{V}{Bd}. \quad (3)$$

Из (1) и (3) следует выражение для радиуса траектории частицы

$$R = \frac{M v}{qB} = \frac{MV}{zq_0 B^2 d}, \quad (4)$$

где z – степень ионизации иона.

Энергия, которую приобретает частица при разгоне разностью потенциалов U

$$\frac{M v^2}{2} = zq_0 U, \quad (5)$$

где мы пока для простоты не учитываем знак U . Поэтому из (3) и (5) получаем

$$V^2 = \frac{2zq_0 U (Bd)^2}{M} \quad (6)$$

Так как частицы одинакового типа, как отношение радиусов, так и отношение позволяет найти степень ионизации частиц. Обозначим как R_{z1} и R_{z2} радиусы, соответствующие степеням

ионизации z_1 и z_2 , как V_{z1} и V_{z2} – напряжения источника питания, и аналогично для других величин. Из (4) и (6) следует

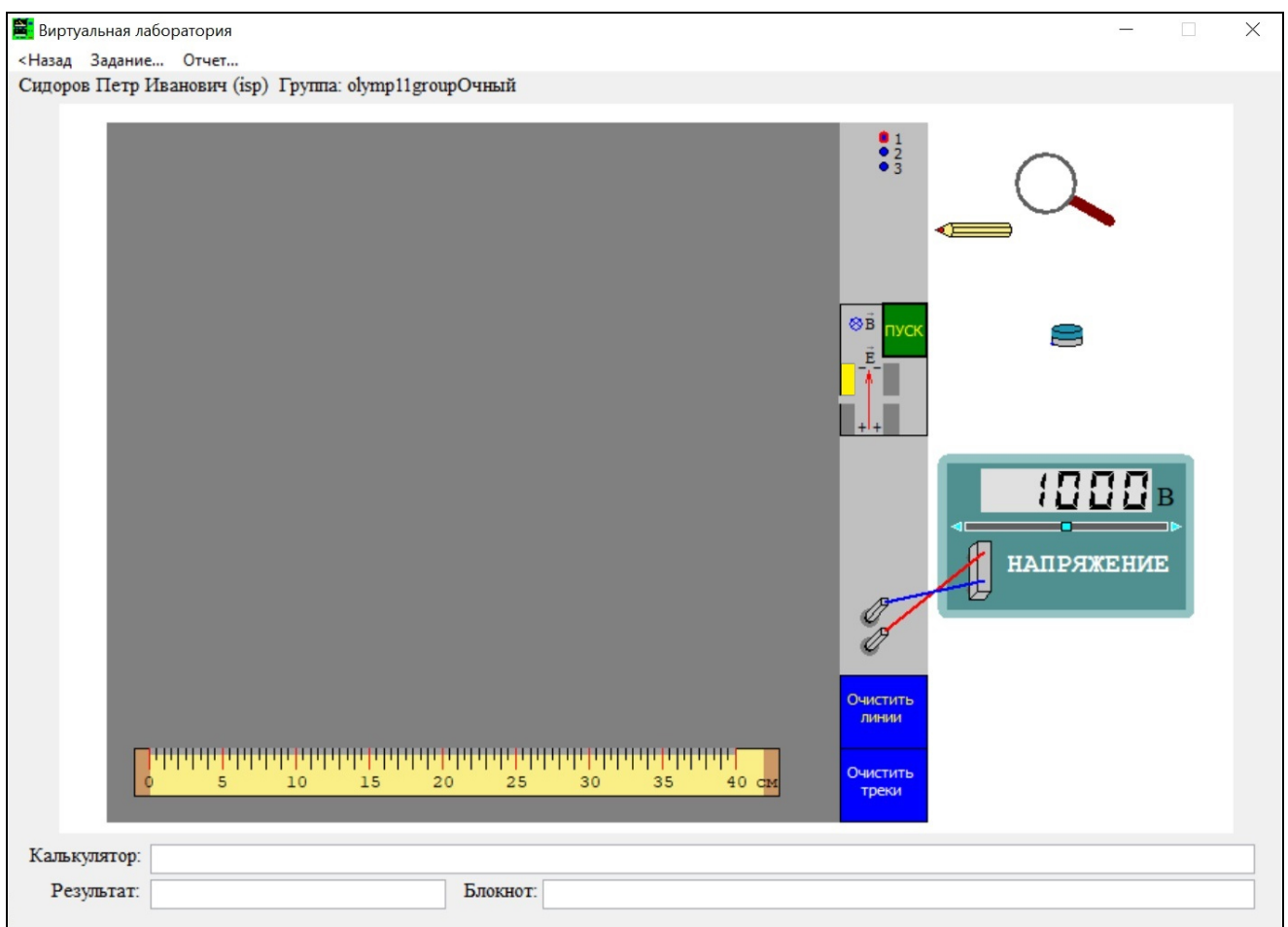
$$\frac{R_{z1}}{R_{z2}} = \frac{z_2}{z_1}, \quad (6)$$

$$\frac{(V_{z1})^2}{(V_{z2})^2} = \frac{z_1}{z_2}, \quad (7)$$

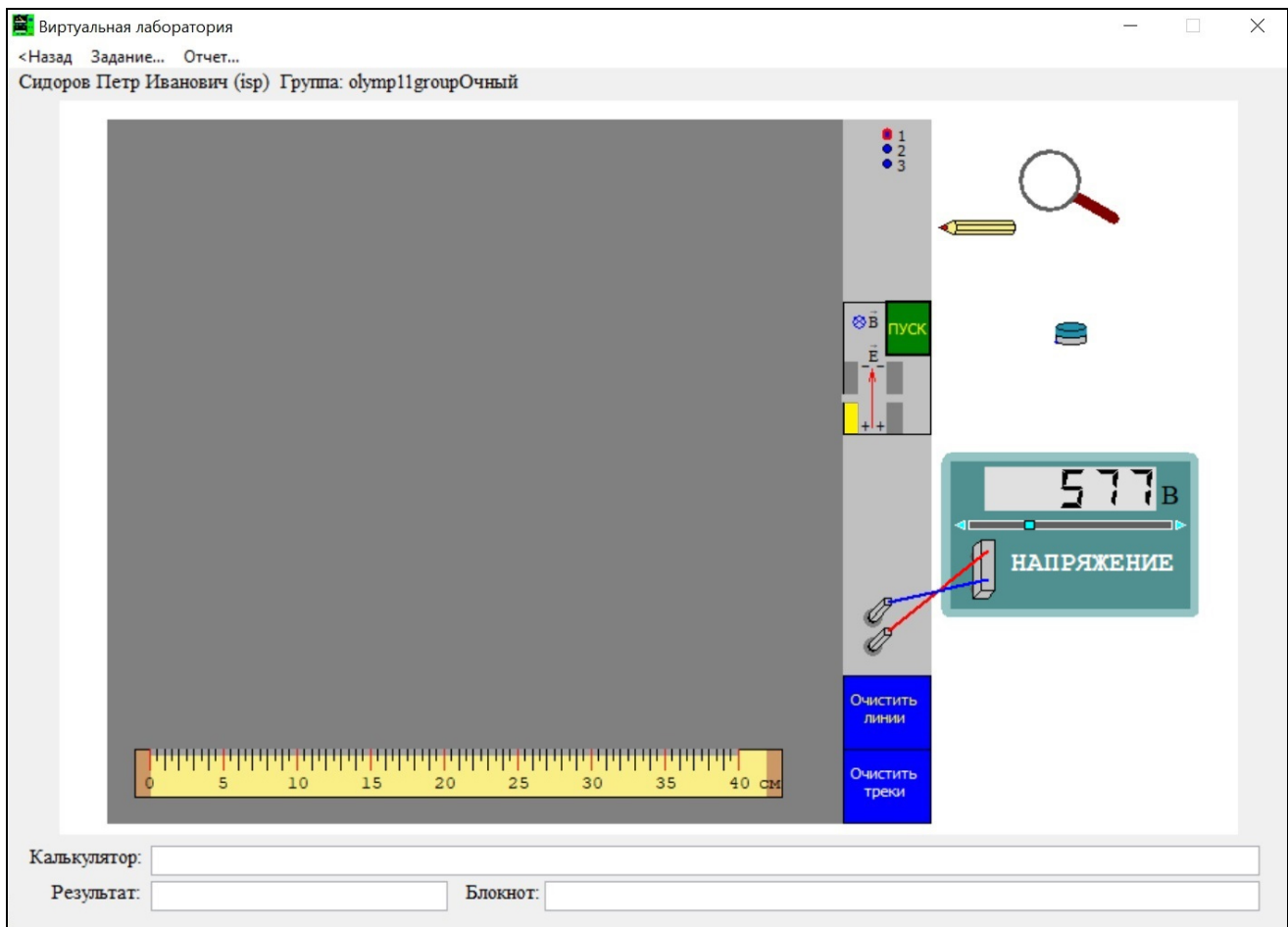
Точность измерения напряжения гораздо выше, поэтому для нахождения z мы будем использовать формулу (7), а не (6).

5.1 Получение трека частицы первого типа

Сначала необходимо установить, в каком положении переключателя при нажатии на зеленую кнопку **Пуск** вылетает однократно ионизированная частица.



Нажимаем на кнопку **Пуск** и видим, что верхний датчик, расположенный около выходного отверстия камеры чуть ниже и левее этой кнопки, вспыхивает желтым цветом. Это означает, что напряженность электрического поля слишком большая, и необходимо уменьшить напряжение питания. Аккуратно передвигаем движок источника влево до тех пор, пока не вспыхивает желтым цветом нижний датчик, расположенный около выходного отверстия камеры.

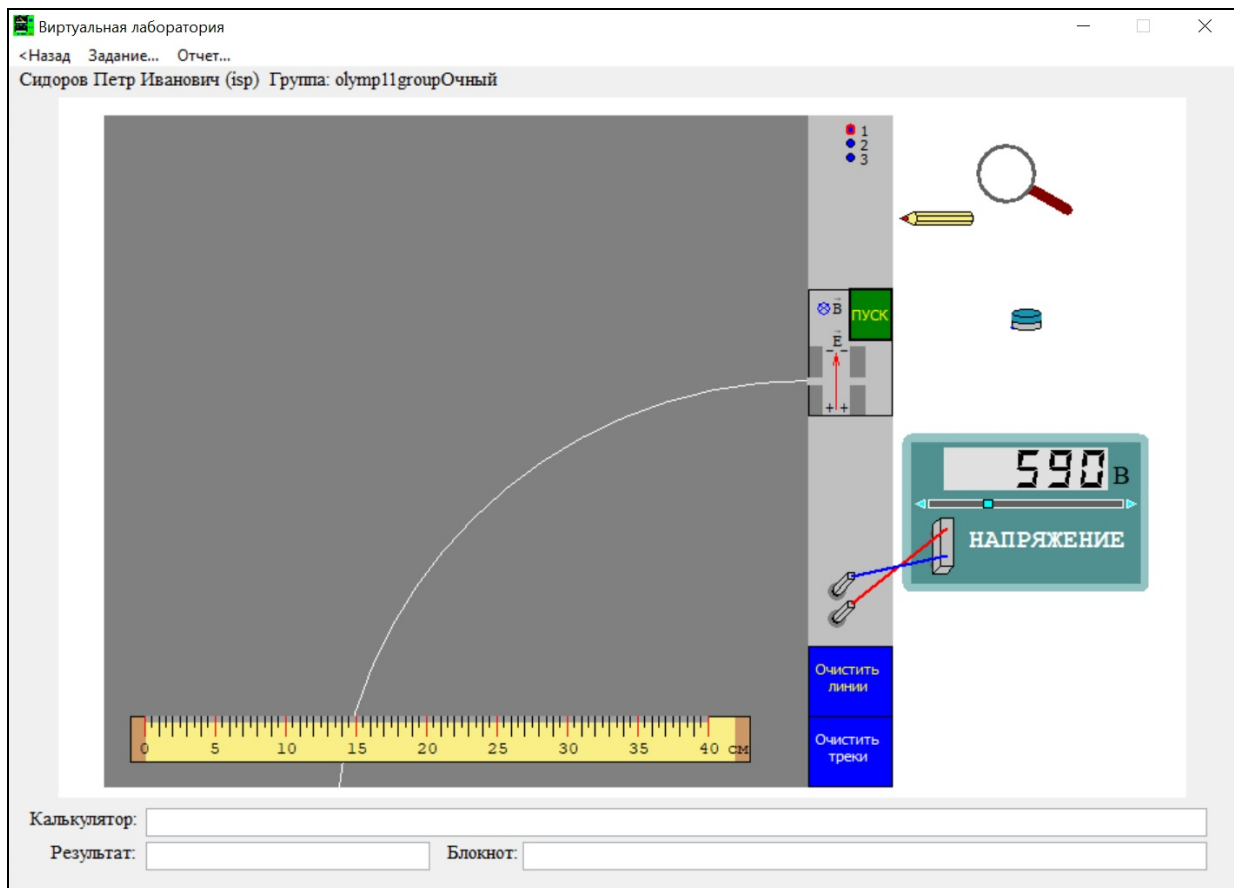


Это означает, что напряженность электрического поля стала чуть ниже необходимой, и необходимо немного увеличить напряжение питания. Теперь можно воспользоваться тонкой регулировкой напряжения питания установки, нажимая на голубой треугольник с правой стороны шкалы регулировки напряжения.

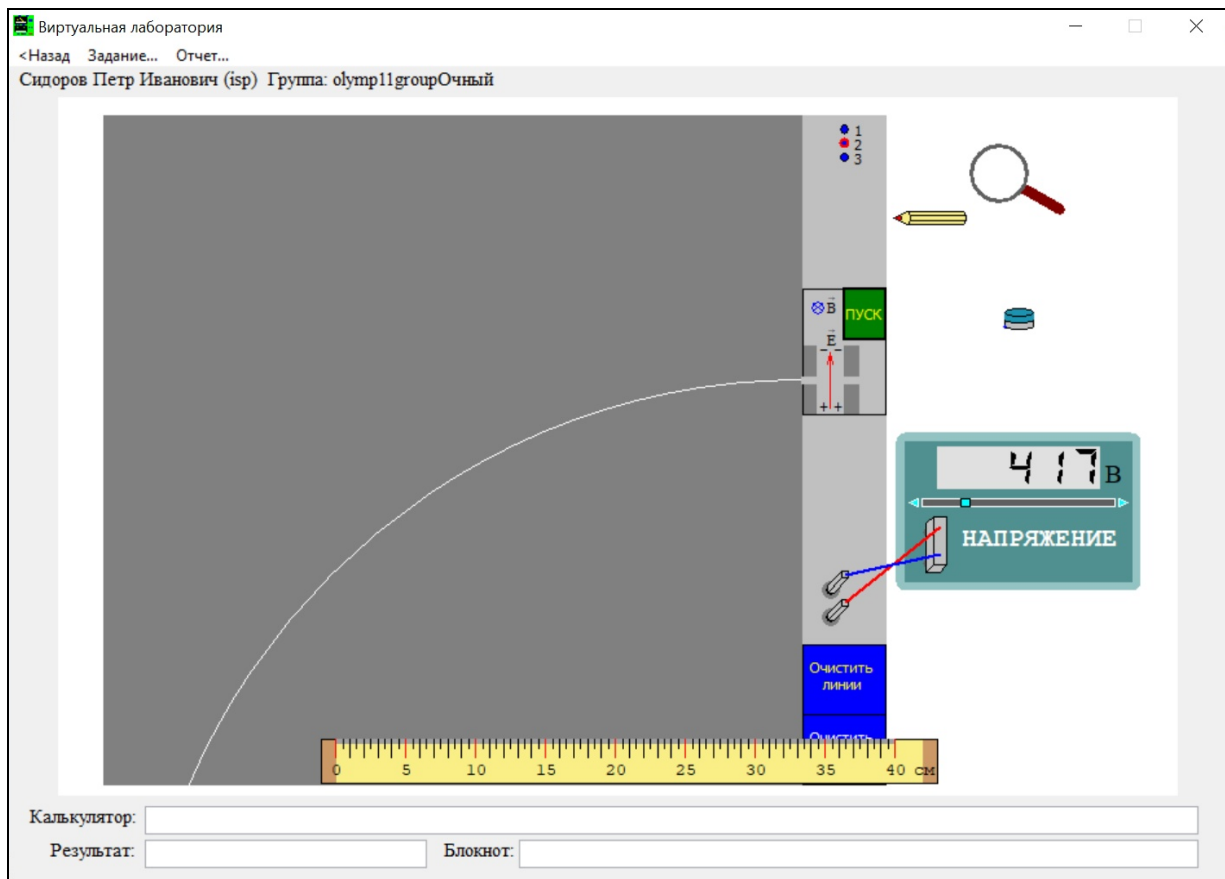
При нажатии на правый голубой треугольник напряжение источника увеличивается на один Вольт, а при нажатии на левый – уменьшается на один Вольт. Перемещением движка можно менять напряжение источника гораздо быстрее, но при этом практически невозможно установить точное напряжение, при котором частица пролетает сквозь выходное отверстие.

На следующем рисунке показана ситуация, когда установлено напряжение $V_1=590$ В, при котором частица вылетела сквозь выходное отверстие.

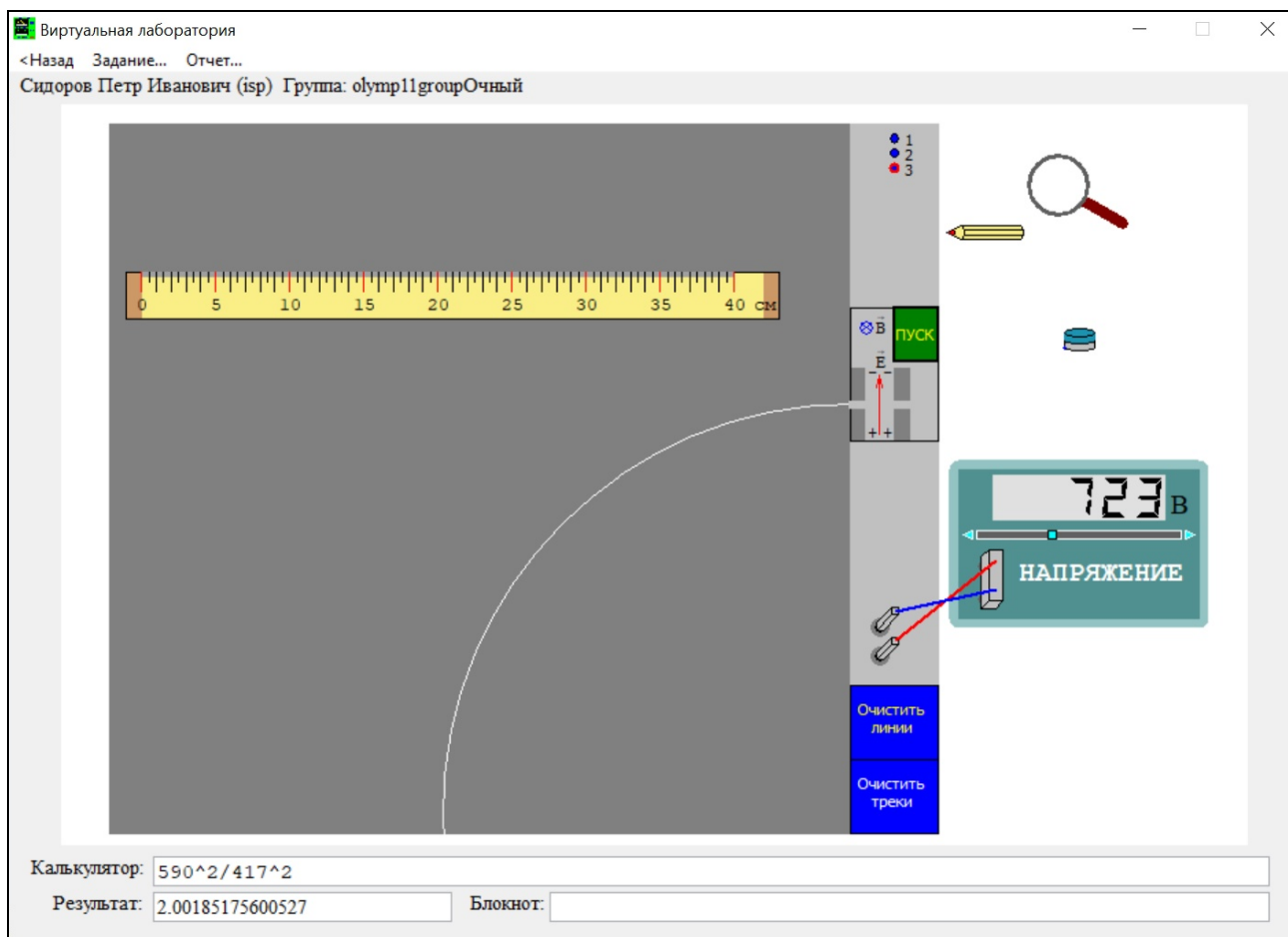
Для достижения такого напряжения после остановки регулировки движком пришлось более десяти раз щелкнуть по правому голубому треугольнику.



5.2 Получение треков частиц второго и третьего типа и нахождение значений z
 Аналогичным образом получаем трек для частицы второго типа, $V_2=417$ В.



Аналогичным же образом получаем трек для частицы третьего типа, $V_3=723$ В.



Таким образом, $V_1=590$ В, $V_2=417$ В, $V_3=723$ В. Найдем отношения квадратов этих напряжений, равное, в соответствии с (7), отношению коэффициентов ионизации:

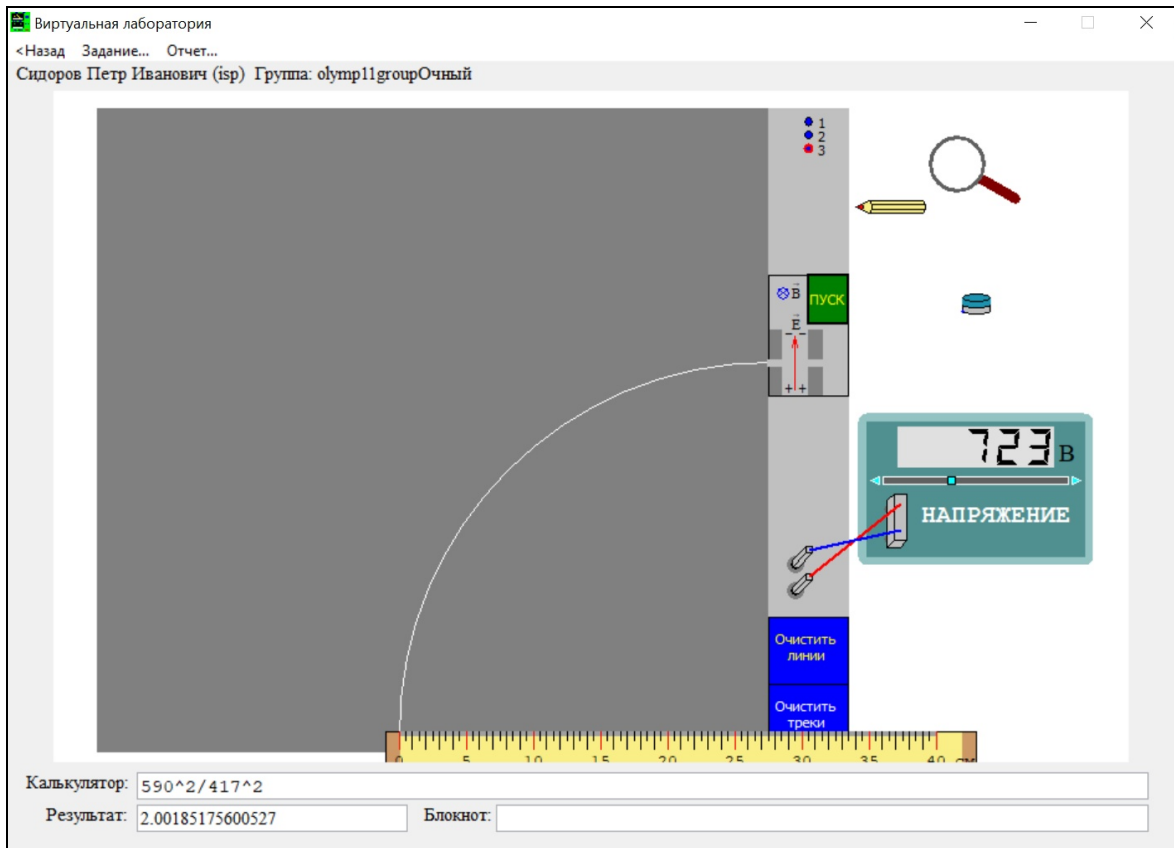
$$\frac{z_3}{z_2} = \frac{(V_3)^2}{(V_2)^2} = \frac{723^2}{417^2} = 3.006, \quad (7)$$

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{(V_1)^2}{(V_2)^2} = \frac{590^2}{417^2} = 2.002. \quad (8)$$

Так как в соответствии с условием значения z лежат от 1 до 4, мы делаем вывод, что $z_2=1$, $z_1=2$, $z_3=3$.

5.3 Нахождение радиуса трека, скорости и массы частицы

Из рисунков треков видно, что только в третьем случае, когда $z_3=3$, удастся увидеть ситуацию, когда после вылета частицы в камеру расстояние от нее до правой стенки начинает уменьшаться. Это позволяет измерить наибольшее расстояние до стенки, равное радиусу, линейкой.



Радиус оказывается равен $R_3 = 27.50$ см.

В соответствии с (3) находим скорость v_3 этой частицы

$$v_3 = \frac{V_3}{Bd} = \frac{723 \text{ В}}{0.1 \text{ Тл} \cdot 10^{-2} \text{ м}} = 723000 \text{ м/с} . \quad (9)$$

Однако нам необходима скорость v_1 , которая, в соответствии с (5), равна

$$v_1 = v_3 \sqrt{z_1 / z_3} = \frac{723000}{\sqrt{3}} \text{ м/с} = 417424 \text{ м/с} . \quad (10)$$

Отсылаем результат на сервер и убеждаемся в правильности ответа.

Отчет

Название	Ответ	Результат	Баллы
Скорость v (м/с)	417424	Правильно	5
Масса M (кг)			0
Масса m (МэВ/ C^2)			0
Потенциал U (В)			0
За текущую попытку :			5
Штрафных баллов :			0
Итого за задание :			5 (из 20)

Очистить Закрыть

Из (4) выражаем массу частицы через радиус трека

$$M = \frac{z_3 q_0 B R_3}{v_3} = \frac{3 \cdot 1.6022 \cdot 10^{-19} \cdot 0.1 \cdot 0.275}{723000} \text{ кг} = 1.828237 \text{ E} - 26 \text{ кг} . \quad (11)$$

Отсылаем результаты на сервер.

Название	Ответ	Результат	Баллы
Скорость v (м/с)	417424	Правильно	5
Масса M (кг)	1.828237E-26	Правильно	5
Масса m (МэВ/С ²)			0
Потенциал U (В)			0
За текущую попытку :			10
Штрафных баллов :			0
Итого за задание :			10 (из 20)

5.4 Нахождение ускоряющего потенциала

Если вы не знаете, как выполнить какую-то часть задания, его можно пропустить и выполнять следующие части. Части заданий, как и сами задания, не обязательно выполнять по очереди. Проиллюстрируем это, пропустив пока ответ на вопрос о массе частицы в единицах энергии, и приступим к ответу на четвертый вопрос.

Из (5) следует, что для $z=3$

$$U = \frac{M v_3^2}{2zq_0} = \frac{1.828237E-26 \cdot 723000^2}{2 \cdot 3 \cdot 1.6022 \cdot 10^{-19}} \text{ В} = 9941.3 \text{ В}. \quad (12)$$

Однако отсылать полученное значение на сервер рано, ведь мы проводили вычисления без учёта знака ускоряющего потенциала. В условии сказано, что степень ионизации положительная, то есть ускоряются положительные ионы. Однако для них ускоряющим будет отрицательная разность потенциалов! Поэтому правильный ответ $U=9941.3 \text{ В}$.

Название	Ответ	Результат	Баллы
Скорость v (м/с)	417424	Правильно	5
Масса M (кг)	1.828237E-26	Правильно	5
Масса m (МэВ/С ²)			0
Потенциал U (В)	-9941.3	Правильно	5
За текущую попытку :			15
Штрафных баллов :			0
Итого за задание :			15 (из 20)

5.5 Нахождение массы частицы в единицах энергии

Нам требуется найти массу m частицы в МэВ/С², где $C=299792 \text{ км/с}$.

В соответствии с приведенным определением

$$\begin{aligned}1 \text{ эВ} &= q_0 \cdot 1 \text{ В} = 1.6022 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}, \\1 \text{ МэВ} &= 10^6 \text{ эВ} = 1.6022 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}, \\1 \text{ Дж} &= 1/(1.6022 \cdot 10^{-13}) \text{ МэВ},\end{aligned}\tag{13}$$

Формула Эйнштейна связи массы M частицы с ее энергией E_M

$$E_M = M C^2.\tag{14}$$

Поэтому из (13) и (14) следует численное равенство

$$m = E_M \cdot 1/(1.6022 \cdot 10^{-13}) = M C^2 / 1.6022 \cdot 10^{-13} = 10255.5 \text{ МэВ}/C^2.$$

Отсылаем результат на сервер.

Отчет

Название	Ответ	Результат	Баллы
Скорость v (м/с)	417424	Правильно	5
Масса M (кг)	1.828237E-26	Правильно	5
Масса m (МэВ/ C^2)	10255.5	Правильно	5
Потенциал U (В)	-9941.3	Правильно	5
За текущую попытку :			20
Штрафных баллов :			0
Итого за задание :			20 (из 20)

Очистить Закрыть