

## Разбор заданий очного тура олимпиады школьников «Открытая интернет-олимпиада по физике по Северо-Западному федеральному округу» для 11-х классов

### Задание 1. Тест (8 вопросов, 15 баллов)

**Сложность задания:** несколько ниже средней (задание средней сложности для рассматриваемого набора участников имеет симметричное относительно среднего балла распределение, сложное – имеет сдвиг в сторону низких баллов, простое – имеет сдвиг в сторону максимального балла)

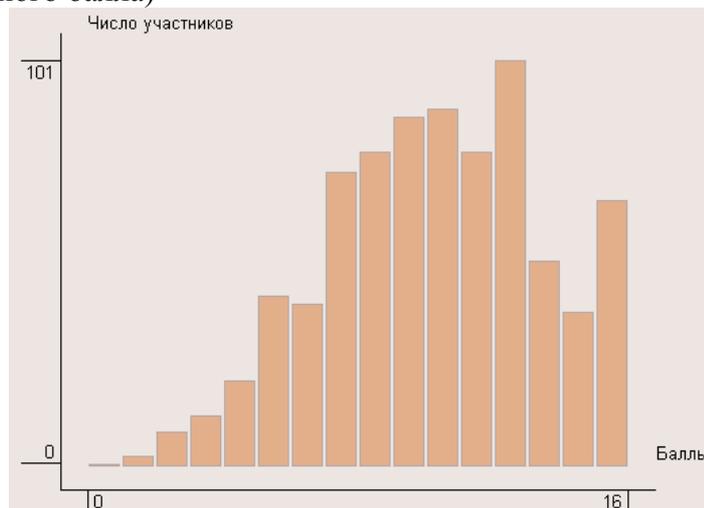
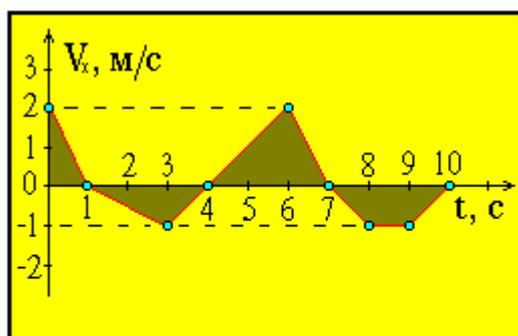


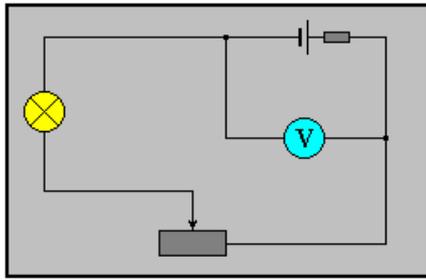
Рис.1 Гистограмма распределения количества участников по числу набранных баллов  
Примеры заданий (8 вопросов, псевдослучайным образом выбираемых из банка, состоявшего из 56 вопросов):



На рисунке представлен график зависимости скорости  $V_x$  тела, движущегося вдоль оси  $X$ , от времени  $t$ . Какой путь прошло тело за время от  $t=0$  до  $t=3$  с?

Варианты ответов:

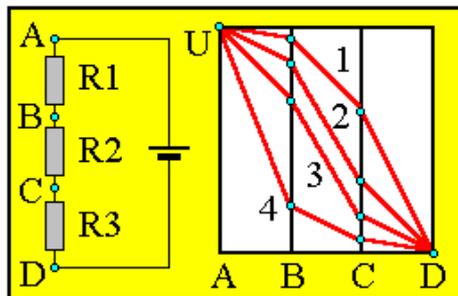
- 0 м
- 1 м
- 2 м
- 3 м
- 4 м



Ползунок реостата, включенного в цепь, переместили влево. Как изменились при этом накал лампы и показания вольтметра?

Варианты ответов:

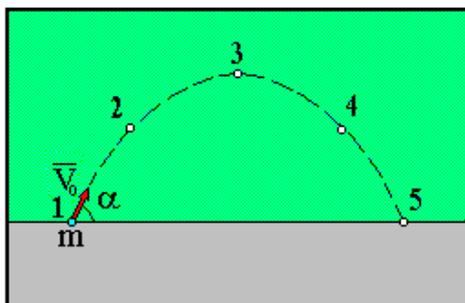
- Накал лампы уменьшился, показания вольтметра не изменились.
- Накал лампы увеличился, показания вольтметра уменьшились.
- Накал лампы и показания вольтметра увеличились.
- Накал лампы и показания вольтметра уменьшились.
- Накал лампы уменьшился, показания вольтметра увеличились.



Выберите график, соответствующий изменению потенциала в точках A, B, C и D, разделенных резисторами  $R_1 = 12 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 6 \text{ Ом}$  и  $R_3 = 7 \text{ Ом}$ .

Варианты ответов:

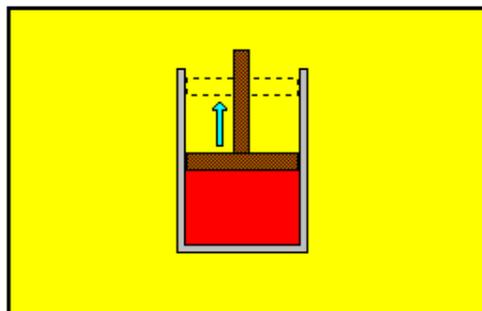
- 1
- 2
- 3
- 4
- Правильного варианта нет.



На рисунке представлена траектория движения тела, брошенного под углом к горизонту. В какой точке траектории кинетическая энергия имела минимальное значение? Сопротивлением воздуха пренебречь.

Варианты ответов:

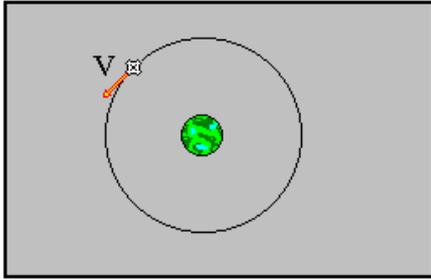
- 1
- 2
- 3
- 4
- Во всех точках одинакова.



Клапаны двигателя внутреннего сгорания закрыты. Сжатая горючая смесь воспламеняется от электрической искры и быстро сгорает. Какому такту это соответствует?

Варианты ответов:

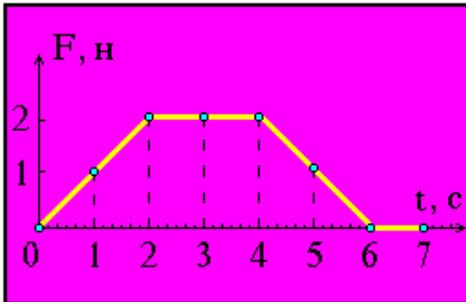
- Выпуску.
- Рабочему ходу.
- Впуску.
- Сжатию.
- Среди ответов 1-4 нет правильного.



Как изменится кинетическая  $E_k$  и потенциальная  $E_{II}$  энергии искусственного спутника Земли, вращающегося по круговой орбите, при уменьшении радиуса орбиты? Влиянием атмосферы пренебречь.

Варианты ответов:

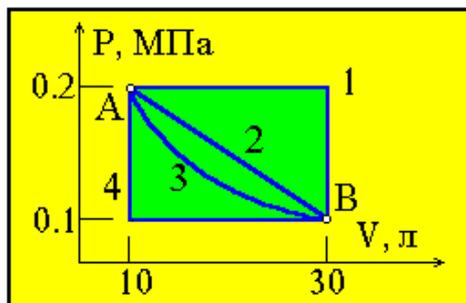
- $E_k$  и  $E_{II}$  уменьшаются.
- $E_k$  и  $E_{II}$  увеличиваются.
- $E_k$  увеличивается,  $E_{II}$  уменьшается.
- $E_k$  уменьшается,  $E_{II}$  увеличивается.
- $E_k$  и  $E_{II}$  остаются без изменения.



Тело начинает двигаться из состояния покоя. На рисунке представлен график зависимости от времени модуля  $F$  равнодействующей всех сил. Направление равнодействующей не изменяется со временем. Каким было движение тела в промежутке от  $t = 4$  с до  $t = 6$  с?

Варианты ответов:

- Равномерным.
- Равноускоренным.
- Тело покоилось.
- Скорость тела возрастала.
- Скорость тела убывала.



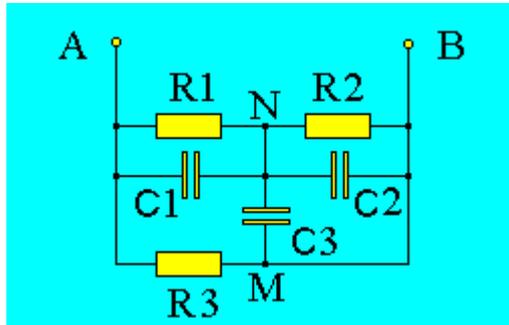
Переход газа из состояния А в состояние В совершается различными способами: 1, 2, 3, 4. В каком случае работа газа будет максимальна?

Варианты ответов:

- 1
- 2
- 3
- 4
- При всех способах работа одинакова.

Тесты присутствовали в олимпиаде исключительно в качестве дополнительного средства мониторинга добросовестности проведения олимпиады и оценки уровня базовых знаний участников, оценка за них составила менее 12% от общего числа баллов.

## Задание 2. Чему равна разность потенциалов? (3 балла)



В схеме на рисунке сопротивления резисторов равны:  $R_1 = 18 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 10 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 1 \text{ Ом}$ . Значения емкостей равны:  $C_1 = 10 \text{ мкФ}$ ,  $C_2 = 13 \text{ мкФ}$ ,  $C_3 = 10 \text{ мкФ}$ . Разность потенциалов  $\Phi_A - \Phi_B = 140 \text{ В}$ . Найдите разность потенциалов  $\Phi_N - \Phi_M$  между точками N и M для устоявшегося состояния системы. В промежуточных вычислениях оставляйте не менее трёх значащих цифр, ответ вводите с точностью до десятых.

Введите ответ:

$$\Phi_N - \Phi_M = \text{ \_\_\_\_\_\_ } \text{ В}$$

**Замечание:** во всех теоретических задачах для каждого участника генерировался свой набор численных значений.

**Сложность задания:** умеренно высокая.

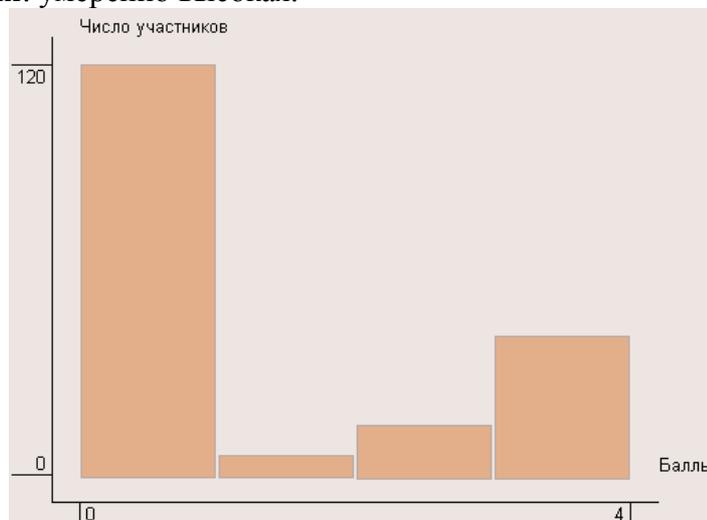


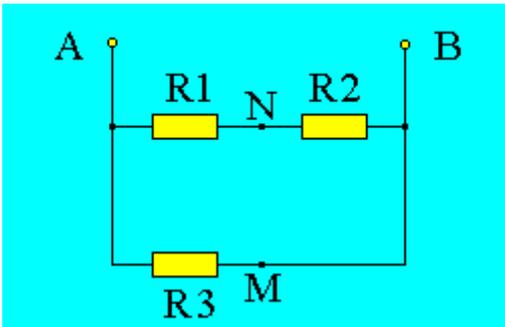
Рис.2 Гистограмма распределения количества участников по числу набранных баллов

Данная задача неожиданно для жюри оказалась слишком сложной для многих участников, хотя может быть решена в уме за несколько секунд. Подавляющее большинство участников даже не приступило к её решению, пропустив её и занявшись следующей задачей.

Из 788 участников стала решать задачу только половина. Из них не решили эту задачу две трети из тех, кто брался.

### Решение:

Задача требует навыков физического мышления. Поскольку задана постоянная разность потенциалов, и режим установившийся, конденсаторы никак не влияют на распределение напряжения в системе. Поэтому их можно убрать:



Замечаем, что точка М имеет такой же потенциал, как точка В. Следовательно, нам необходимо найти разность потенциалов между точками N и В – то есть падение напряжения на резисторе R2. Оно равно  $I \cdot R_2$ , где I – ток, протекающий через резисторы R1 и R2. Но  $I = (\Phi_A - \Phi_B) / (R_1 + R_2)$ , поэтому  $\Phi_N - \Phi_M = (\Phi_A - \Phi_B) \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$

### Задание 3. Какое количество теплоты нужно передать? (4 балла)

В стальную кастрюлю массой  $m_1 = 1.6$  кг налита вода массой  $m_2 = 1.4$  кг. Какое количество теплоты нужно передать кастрюле с водой для изменения их температуры от  $t_1 = 20^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 90^\circ\text{C}$ . Удельная теплоемкость стали  $C_1 = 0.5$  кДж/кг  $\cdot$   $^\circ\text{C}$ , воды  $C_2 = 4.2$  кДж/кг  $\cdot$   $^\circ\text{C}$ . Ответ выразите в килоджоулях с точностью до целых.

Вычисления проводить с точностью до 4 значащих цифр.

Введите ответ:

Количество теплоты  $Q = \underline{\hspace{2cm}}$  кДж

**Сложность задания:** очень низкая, с задачей справилось подавляющее большинство участников.

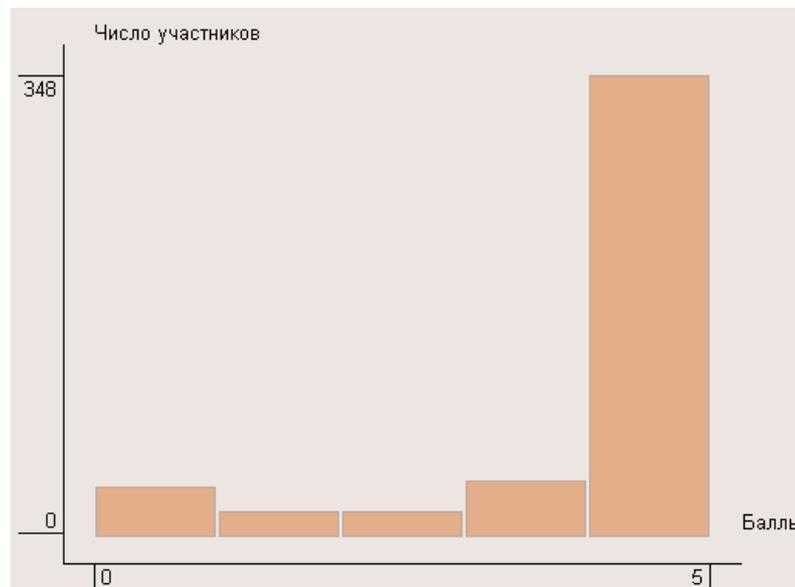


Рис.3 Гистограмма распределения количества участников по числу набранных баллов

**Решение:**

Количество переданного тепла  $Q = C_1 \cdot m_1 \cdot (t_2 - t_1) + C_2 \cdot m_2 \cdot (t_2 - t_1)$

#### Задание 4. Вычислите среднюю скорость движения человека (4 балла)

Вычислите среднюю скорость  $v$  движения человека, если первую треть пути он шел со скоростью  $v_1=1.1$  м/с, а оставшуюся часть пути со скоростью  $v_2=0.6$  м/с. Ответ вводите с точностью до сотых.

Введите ответ:

Средняя скорость движения человека= \_\_\_\_\_ м/с

**Сложность задания:** низкая, с задачей справилось большинство участников.

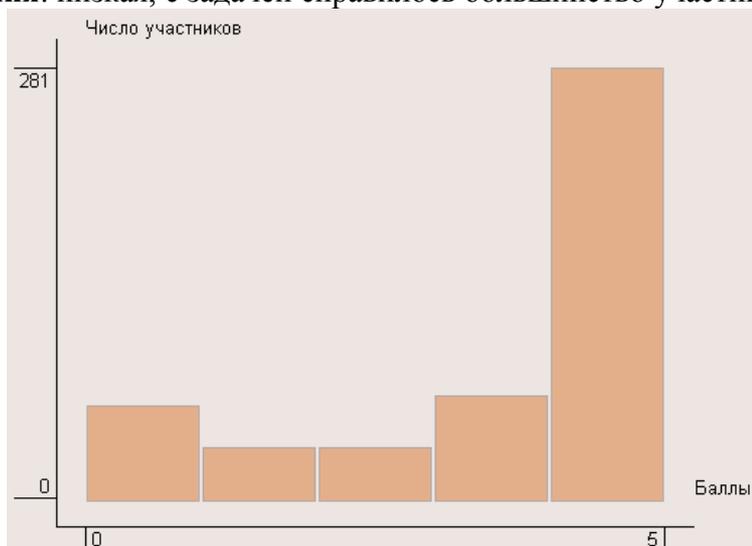


Рис.4 Гистограмма распределения количества участников по числу набранных баллов

#### Решение:

Обозначим весь путь как  $s$ . Тогда первая треть пути  $s_1 = s/3$ , вторая часть пути  $s_2 = 2/3*s$   
Время, затраченное на части пути:  $t_1 = s_1/v_1$ ,  $t_2 = s_2/v_2$ . Полное время  $t = t_1+t_2$ ,  
 $v = s/t = s/(t_1+t_2) = s/(s_1/v_1+s_2/v_2) = s/(s/3/v_1 + s*2/3/v_2) = 1/(1/(3*v_1) + 2/(3*v_2))$   
 $v = 3*v_1*v_2/(2*v_1+v_2)$

#### Задание 5. Найдите плотности шариков (6 баллов)

Два шарика объемом  $9 \text{ см}^3$  каждый связаны нитью и плавают в жидкости так, что один из шариков полностью погружен в неё, а верхний погружен наполовину. Нить вертикальна. Масса нижнего шарика  $m_2$  в 2.5 раза больше, чем масса  $m_1$  верхнего. Плотность жидкости  $\rho=1.3 \text{ г/см}^3$ . Найдите плотности шариков  $\rho_1$  и  $\rho_2$ .

Ответ вводить с точностью до сотых. Вычисления проводить с точностью до 4 значащих цифр.

Введите ответ:

Плотность верхнего шарика  $\rho_1 =$  \_\_\_\_\_ г/см<sup>3</sup>

Плотность нижнего шарика  $\rho_2 =$  \_\_\_\_\_ г/см<sup>3</sup>

**Сложность задания:** чуть ниже средней сложности, с ней справилось большое количество участников.

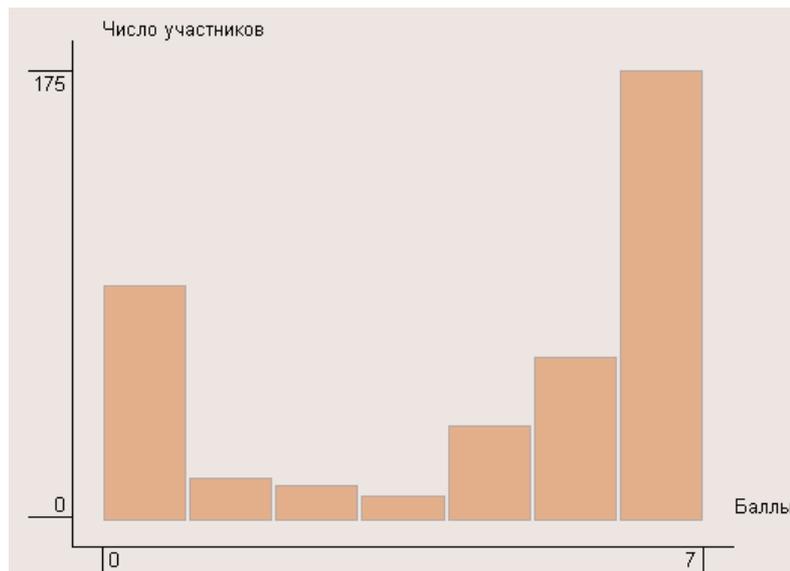


Рис.5 Гистограмма распределения количества участников по числу набранных баллов

**Решение:**

Обозначим  $\frac{m_2}{m_1} = k$ .

Архимедова сила равна  $1.5 \rho gV$ . Система находится в равновесии, т.е. суммарная сила, действующая на шарики, равна нулю:

$$1.5 \rho gV - (k+1) m_1 g = 0,$$

отсюда:  $\rho_1 = \frac{1.5 \rho V}{k+1}$ ,  $\rho_2 = k\rho_1$

### **Задание 6. Модель: Найдите внутреннее сопротивление источника тока и сопротивления резисторов (36 баллов)**

Найдите, чему равно внутреннее сопротивление источника тока и неизвестные сопротивления резисторов. Соберите для этого необходимую электрическую схему и проведите измерения. Измерение тока работает только на диапазоне 200 микроампер и 10 ампер, измерение напряжения - на всех диапазонах. Внутреннее сопротивление мультиметра в режиме измерения тока пренебрежимо мало, а в режиме вольтметра очень велико.

**Занесите результаты в отчёт и отошлите его на сервер. В отчёте сопротивления указывать с точностью до десятых долей процента. В промежуточных вычислениях округлений не делать.**

Размер мультиметра можно увеличивать или уменьшать с помощью стрелок в его левом верхнем углу. Элементы можно перетаскивать мышью и подключать к клеммам панели. К малым клеммам можно подсоединять мультиметр - измерительный прибор, позволяющий измерять токи и напряжения. К малым клеммам можно подсоединять перемычки - провода, имеющие практически нулевое сопротивление.

Тип измеряемой величины и предел измерительной шкалы мультиметра меняется с помощью поворота ручки. Напряжение источника постоянного тока регулируется перемещением его движка.

**Сложность задания:** очень высокая, с ним справилось в полном объёме с первой попытки 5 участников из 788, т.е. 0.6% участников очного тура, а в конечном итоге 16 участников, т.е. 2% участников. При этом характерное время выполнения задания от 30 минут до полутора часов.

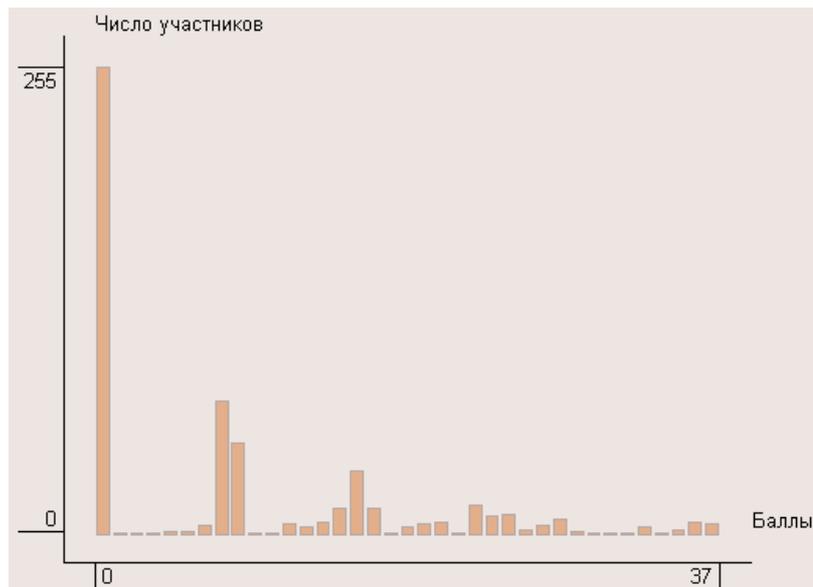


Рис.6 Гистограмма распределения количества участников по числу набранных баллов

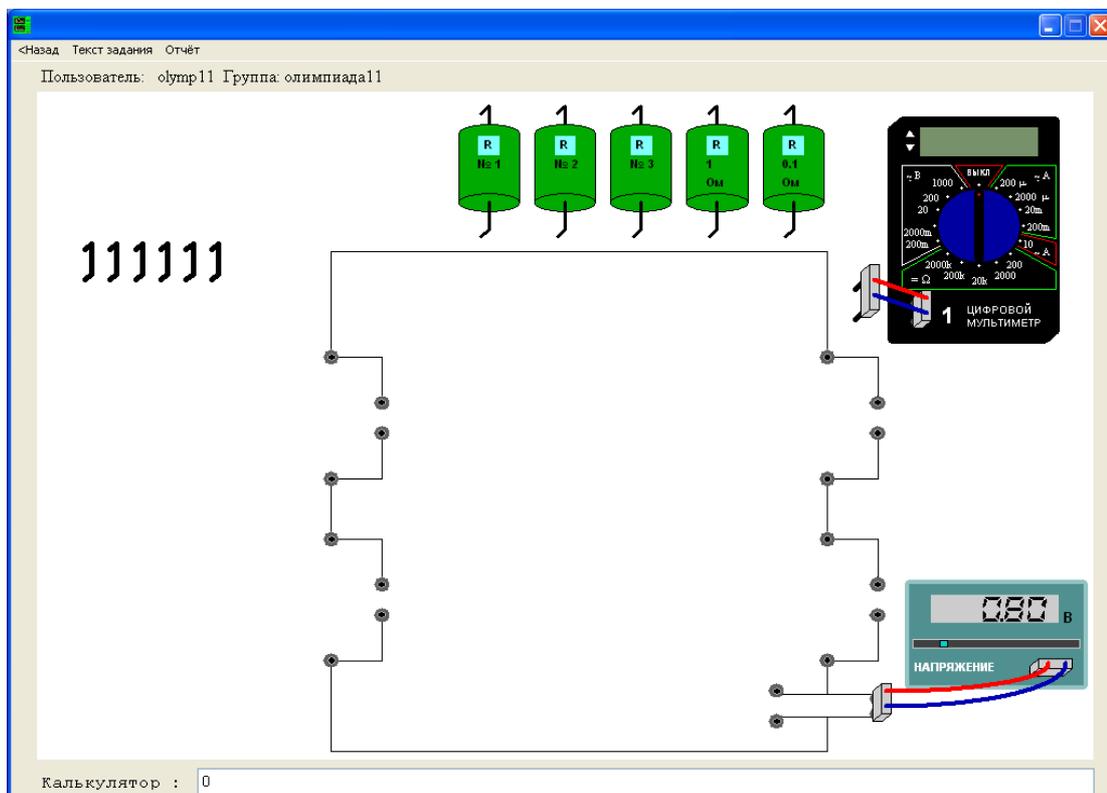


Рис.6.1 Начальное состояние системы – “холостой ход”

**Решение:**

Для данного задания существует большое количество путей нахождения правильного решения – это принципиальная особенность предлагаемых моделей виртуальных лабораторий. Рассмотрим некоторые из вариантов.

**Часть 1. Найти внутреннее сопротивление  $r$  источника напряжения.**

- получить правильный ответ можно по напряжению холостого хода (в данном случае  $V_0=0.8 \text{ В}$  – рис.6.1) и току короткого замыкания ( $I_1=6.65 \text{ А}$  - рис.6.2):  $r=V_0/I_1=0.80/6.65 \text{ Ом} = 0.12 \text{ Ом}$ .

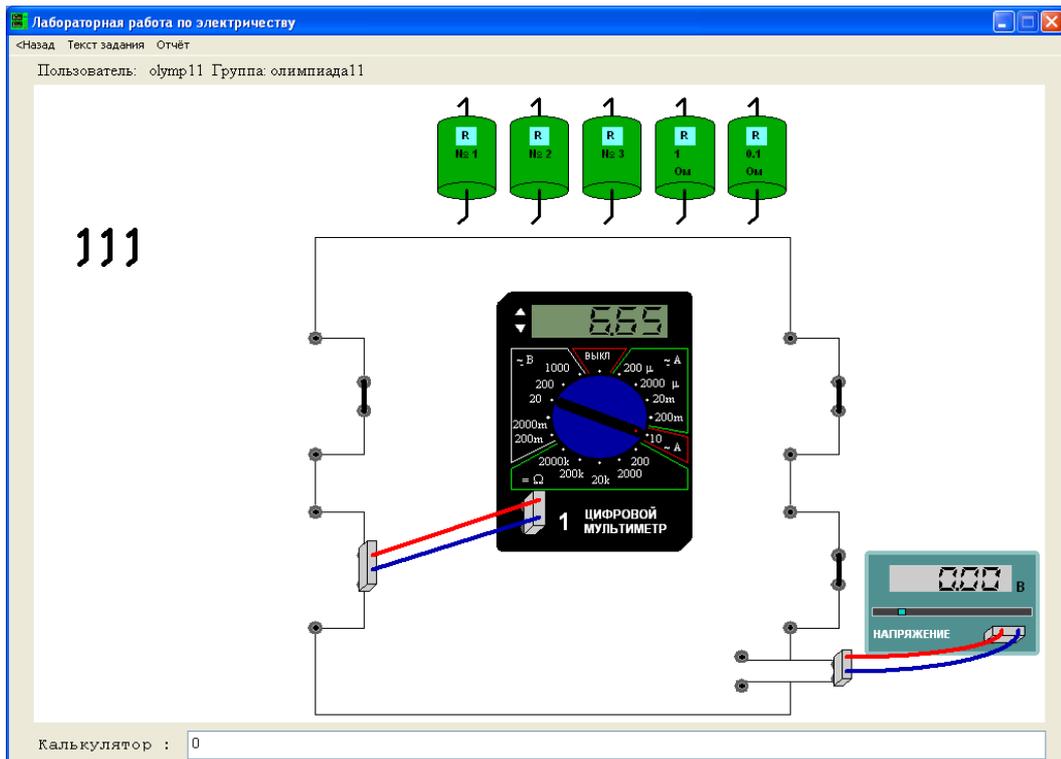


Рис.6.2 Измерение тока короткого замыкания

**Часть 2. Найти сопротивление R1 первого резистора.**

- собираем соответствующую электрическую цепь, а мультиметр переключаем в режим микроамперметра (диапазон 200 мкА) – рис. 6.3. Получаем  $R1 = 0.80/22.8E-6 \text{ Ом} = 35087.7 \text{ Ом}$ . Допустим, мы ошиблись, и разделили не на  $22.8E-6 \text{ А}$ , а на  $22.8E-3 \text{ А}$ , из-за чего ввели  $35.09 \text{ Ом}$ , значения R2 и R3 не ввели и отослали результаты на сервер – рис. 6.4. В результате мы получим форму с информацией о проверке отосланных результатов – рис. 6.5.

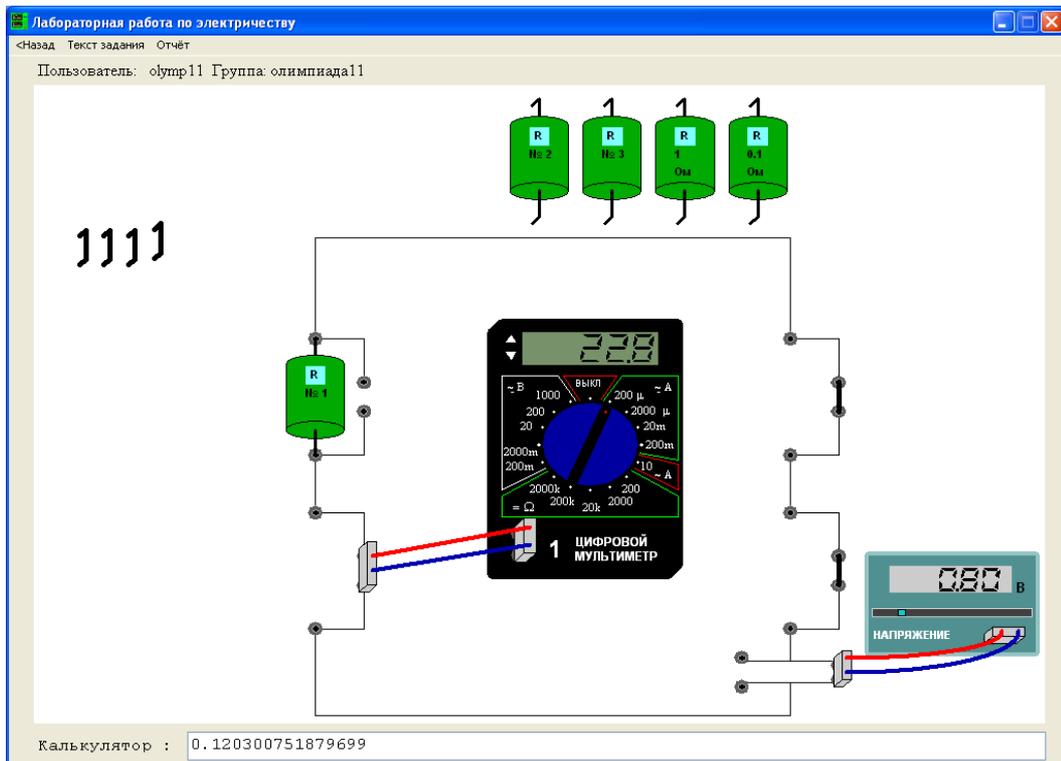


Рис.6.3 Измерение сопротивления R1

Отчет

Внутреннее сопротивление источника	0.12	Ом
Сопротивление R1	35.09	Ом
Сопротивление R2		Ом
Сопротивление R3		Ом

Отправить результаты на сервер

Очистить      Закрыть

Рис.6.4 Отсылка отчёта с результатами

Отчет

Название	Ответ	Результат	Баллы
Внутреннее сопротивление источника (Ом)	0.12	Правильно	8
Сопротивление R1 (Ом)	35.09	Неправильно	0
Сопротивление R2 (Ом)	0	Неправильно	0
Сопротивление R3 (Ом)	0	Неправильно	0
За текущую попытку :			8
Штрафных баллов :			10
Итого за задание :			5.78 (из 36)

Очистить      Закрыть

Рис.6.5 Отчёт по отосланным результатам

После ввода в качестве ответа 35088 мы получаем сообщение, что R1 измерено правильно. Правильный ответ  $35000 \pm 350$  Ом, допустимая погрешность выбрана достаточно большой для того, чтобы данную часть задания было проще выполнить. – чтобы проверялось базовое умение находить сопротивление элемента на основе измерения напряжения и тока с помощью цифровых приборов.

### Часть 3. Найти сопротивление R2 второго резистора.

Попытка измерения R2 таким же способом, как и R1 обречена на неудачу – микроамперметр зашкаливает (рис.6.6). При этом на вольтметре источника тока напряжение заметно уменьшилось, и можно попытаться измерить R2 на основе этого и уже известного нам внутреннего сопротивления источника.

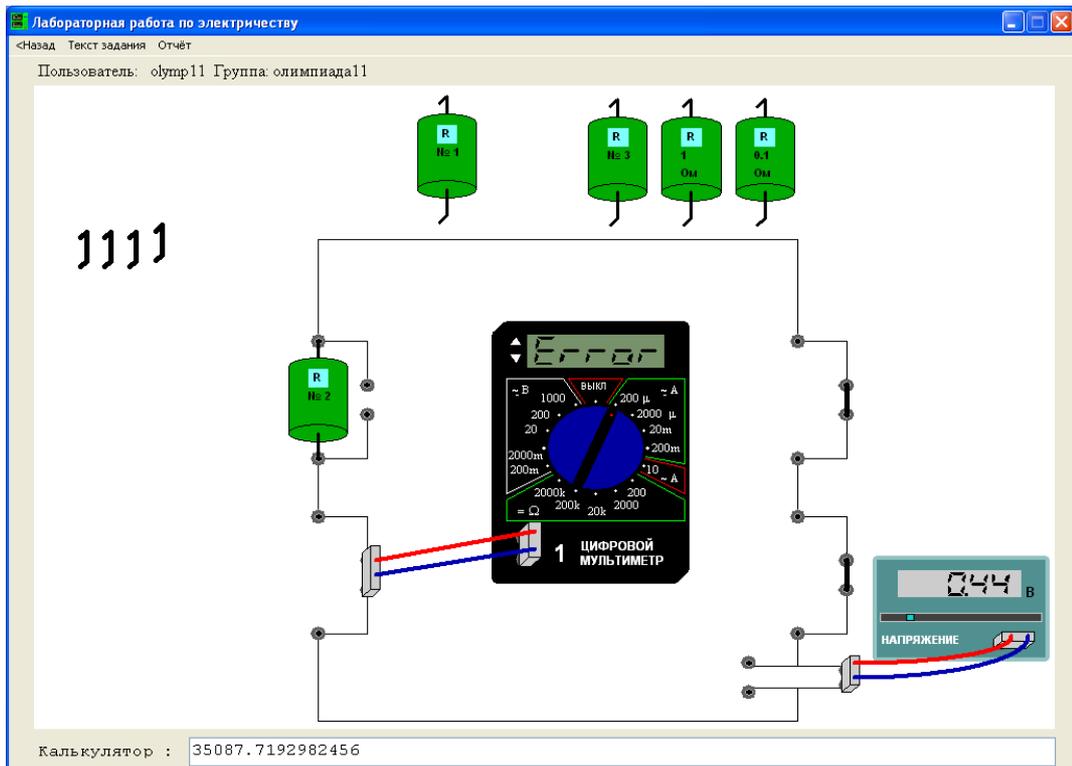


Рис.6.6 Неудачная попытка измерения сопротивления R2

$I_2 = V_0 / (r + R_2)$ , т.е.  $R_2 = V_0 / I_2 - r$ . Падение напряжения на внутреннем сопротивлении источника  $V_r = I_2 * r = 0.8 \text{ В} - 0.44 \text{ В} = 0.36 \text{ В}$ . Следовательно,  $I_2 = V_r / r = 0.36 \text{ В} / 0.12 \text{ Ом} = 3.0 \text{ А}$ , поэтому  $R_2 = (0.8 / 3.0 - 0.12) \text{ Ом} = 0.14667 \text{ Ом}$ .

Несмотря на кажущуюся правильность решения значение R2 не будет засчитано. Это связано с недостаточной точностью измерений.

Другой вариант, приводящий к правильному ответу: можно непосредственно измерить ток I2 на диапазоне 10 А – мы получим  $I_2 = 2.96 \text{ А}$ ,  $R_2 = (0.8 / 2.96 - 0.12) \text{ Ом} = 0.15027 \text{ Ом}$ .

Другой вариант, приводящий к правильному ответу: можно поставить сопротивление  $r_{01} = 0.1 \text{ Ом}$  последовательно с резистором R2 и измерить падения напряжения на R2 и на сопротивлении  $r_{01}$ . И по измеренным напряжениям V2 и V01 найти  $R_2 = V_2 / V_{01} * r_{01}$ .

#### Часть 4. Найти сопротивление R3 третьего резистора.

Попытка непосредственного измерения тока через резистор на диапазоне 200 мкА даёт зашкал, а на диапазоне 10 А ток оказывается на уровне 0.01 А (рис. 6.7).

Поэтому правильное решение в данной части задания – измерить падение напряжения на резисторе 1 Ом. При этом требуется отрегулировать напряжение источника тока так, чтобы напряжение на резисторе 1 Ом было близко к максимальному, показываемому милливольтметром на диапазоне 200 мВ (рис. 6.8) – это обеспечит максимальную точность измерений.

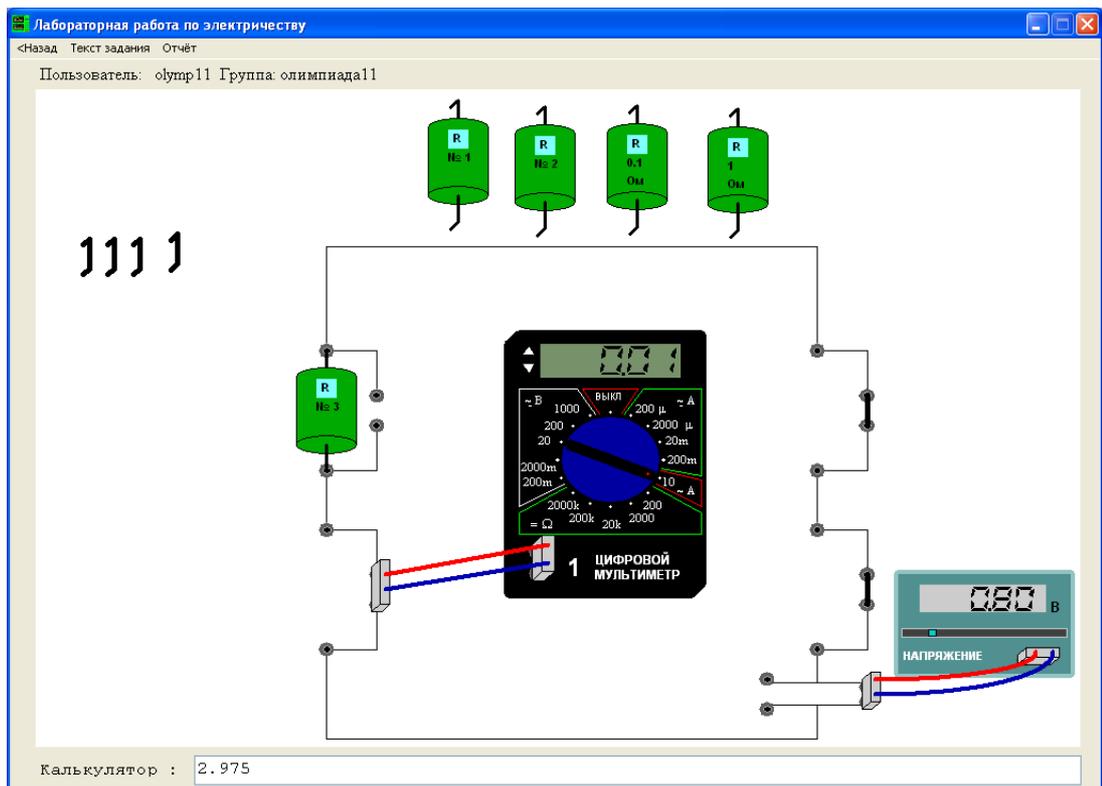


Рис.6.7 Неудачная попытка измерения сопротивления R3

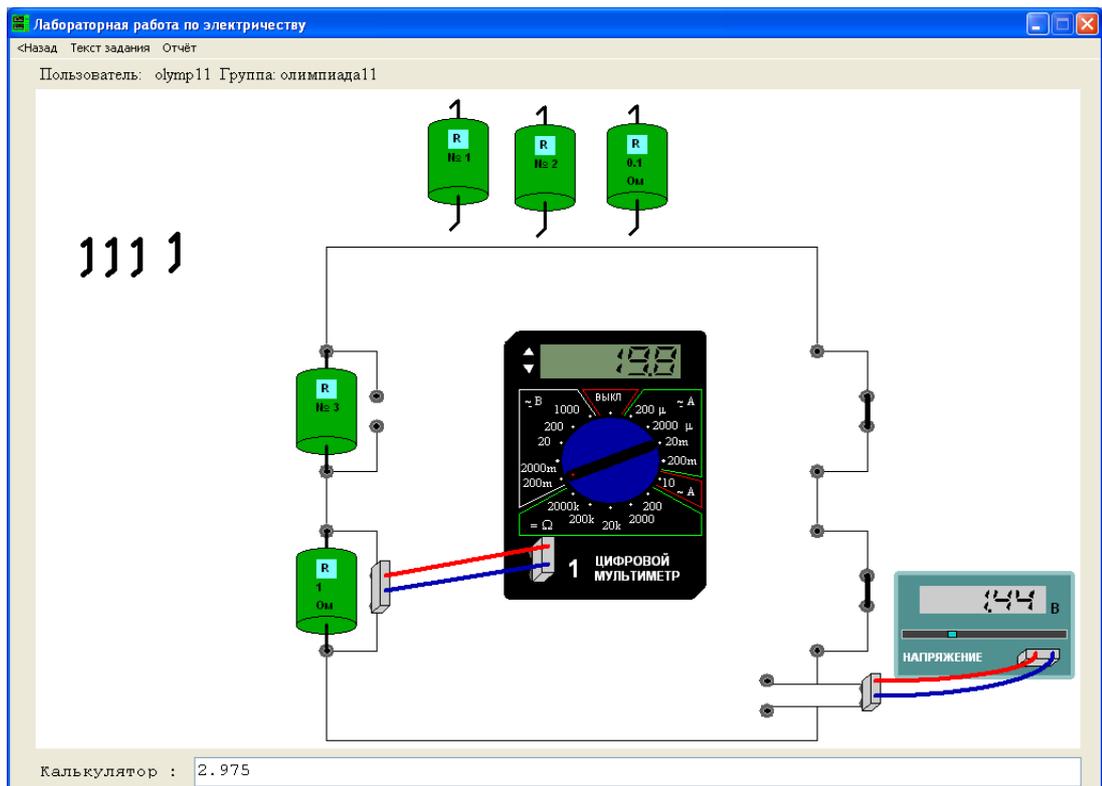


Рис.6.8 Измерение сопротивления R3

### Задание 7. Чему будет равно расстояние между частицами? (8 баллов)

Из одной точки вылетают одновременно две частицы с горизонтальными противоположно направленными скоростями 20 м/с и 45 м/с. Чему будет равно расстояние между частицами в тот момент когда угол между направлениями скоростей этих частиц будет равен  $90^\circ$ ? Соппротивлением воздуха можно пренебречь.

Ускорение свободного падения считать равным  $9.8 \text{ м/с}^2$ .

Ответ вводить с точностью до десятых.

Введите ответ:

Расстояние между частицами  $L = \underline{\hspace{2cm}}$  м

**Сложность задания:** умеренно высокая. С ним справился в полном объёме с первой попытки 51 участник, а в конечном итоге 76 участников из 210 участников, пытавшихся решать задачу.

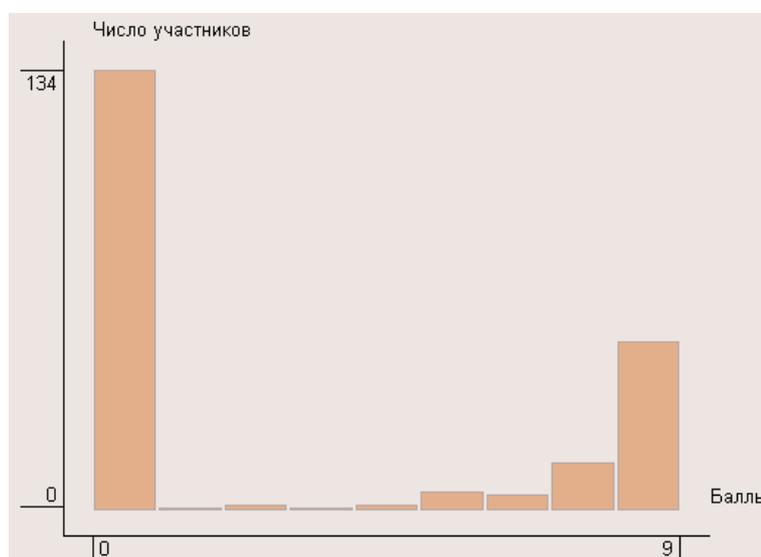


Рис.7 Гистограмма распределения количества участников по числу набранных баллов

#### Решение:

Когда угол между скоростями равен  $90^\circ$  скалярное произведение скоростей обращается в ноль, поэтому  $v_{1x}v_{2x} + v_{1y}v_{2y} = 0$ . Следовательно,  $-v_1v_2 + g^2t^2 = 0$ , отсюда  $t = \frac{\sqrt{v_1v_2}}{g}$ .

Таким образом,  $L = \frac{\sqrt{v_1v_2}}{g} (v_1 + v_2)$

Аналогичные результаты можно получить, рассматривая проекции скоростей и находя соотношения между ними на основе подобия треугольников со взаимно перпендикулярными сторонами.

### Задание 8. Модель: Гидравлический пресс (28 баллов)

В сообщающихся сосудах находится вода (плотность  $1 \text{ г/см}^3$ ). Сверху положены невесомые диски, на которые можно ставить тела.

Определите объём кубов, площади поперечного сечения левого и правого сосудов, а также массы первого и второго куба. Объёмы и площади определите с точностью до единиц, а массы – до десятков. Массы гирь указаны в граммах. Ускорение свободного падения считайте равным  $9.8 \text{ м/с}^2$ . Занесите ваши результаты в отчёт и отправьте его на сервер для проверки. Задания можно

переделывать, но за каждую повторную отсылку результатов на сервер назначается по одному штрафному баллу.

Линейку можно перемещать, в том числе при использовании увеличительного стекла.

Увеличительное стекло позволяет просматривать в увеличенном масштабе нужный участок экрана. Щелчок мышью в любом месте экрана (кроме линейки) возвращает первоначальный масштаб.

**Сложность задания:** очень высокая, с ним справилось в полном объёме с первой попытки 11 участников из 788, т.е. 1.4% участников очного тура, а в конечном итоге 25 участников, т.е. 3% участников. При этом характерное время выполнения задания от 30 минут до полутора часов.

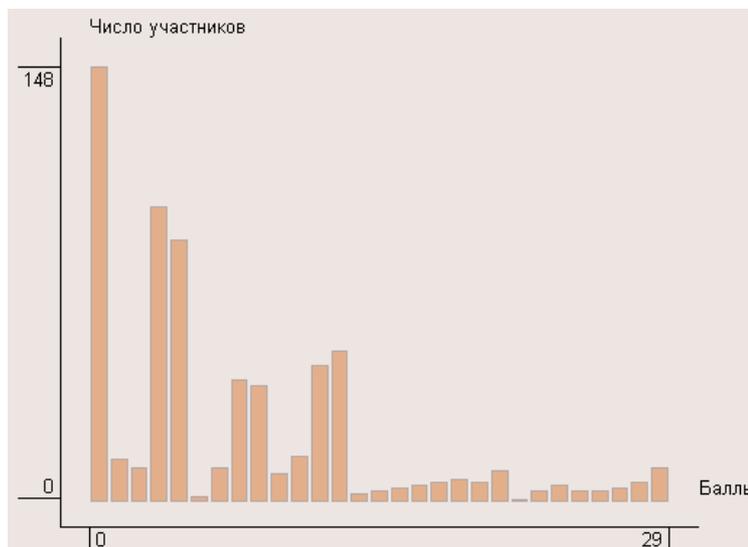


Рис.8 Гистограмма распределения количества участников по числу набранных баллов

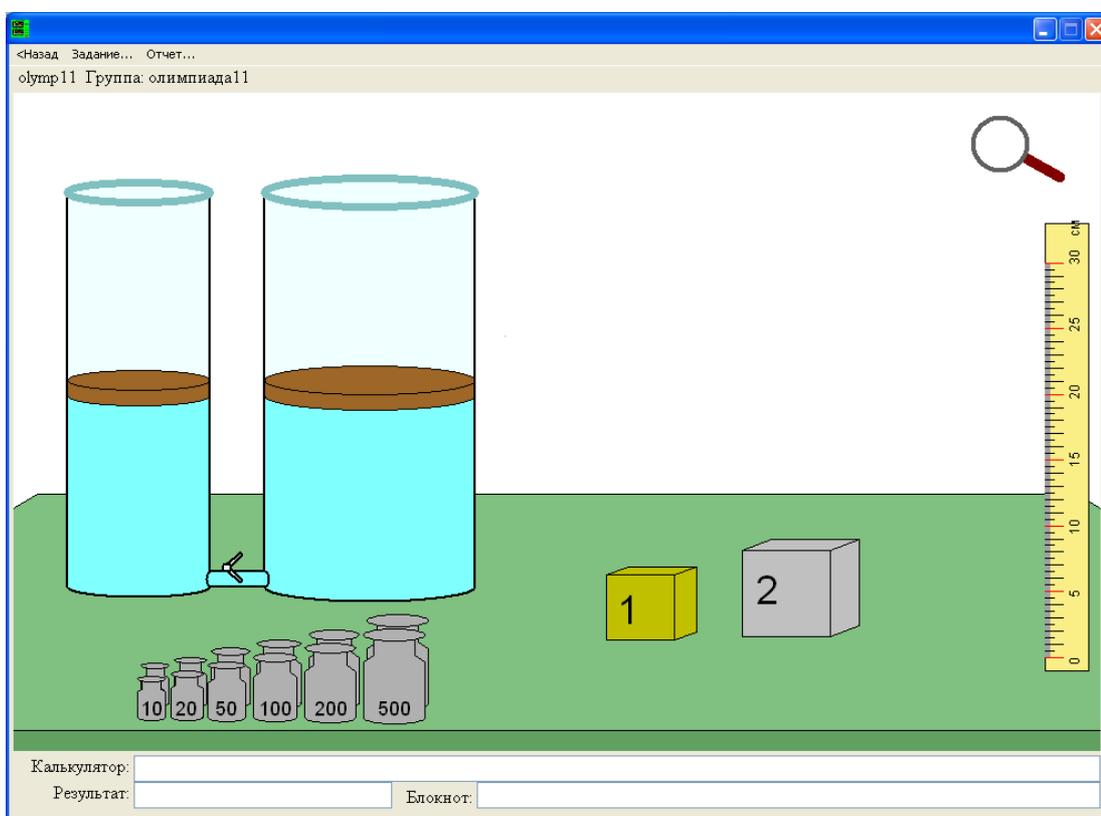


Рис.8.1 Начальное состояние системы

**Решение:**

**Часть 1. Объём куба1**

Длина ребра куба находится с помощью линейки и увеличительного стекла (рис.8.2).

Объём куба находится как длина ребра, возведённая в куб.

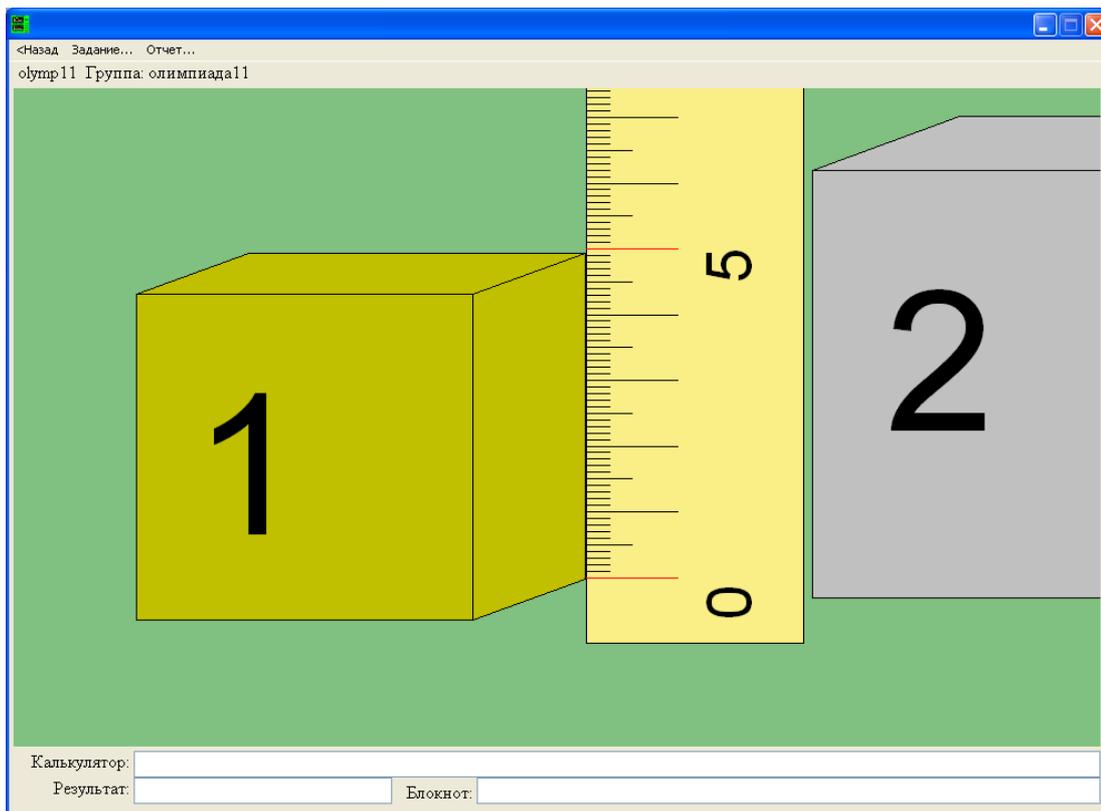


Рис.8.2 Измерение длины ребра куба1

**Часть 2. Объём куба2**

Находится совершенно аналогично.

**Часть 3. Площадь поперечного сечения левого сосуда.**

**Часть 4. Площадь поперечного сечения правого сосуда.**

- существует несколько путей решения этих двух частей задания.

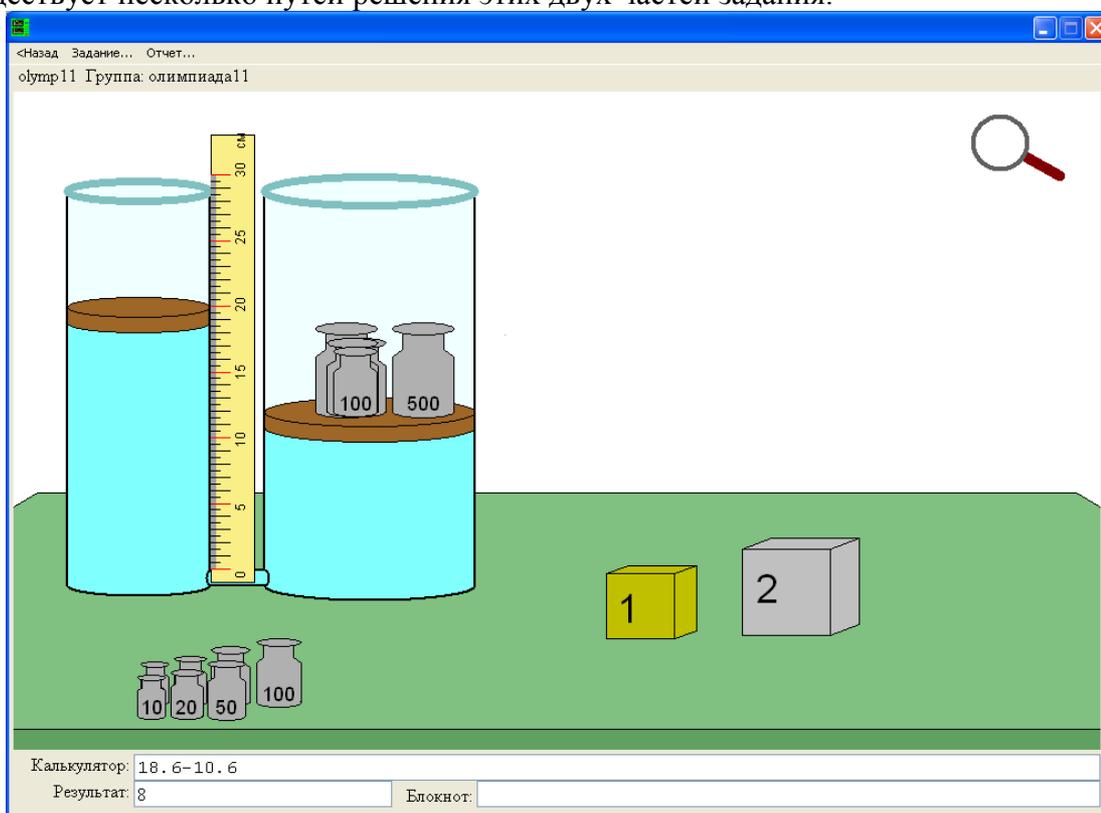


Рис.8.3 Измерение высоты жидкости в левом сосуде

Рассмотрим следующий способ: измерим, на какую высоту поднимется столб жидкости в левом сосуде относительно правого в случае, если поставить на правый поршень груз 1.5 кг (рис.8.3). Измерять высоту можно от любого уровня, но для повышения точности можно выбрать один из краев соединяющей сосуда трубки.

В нашем случае это  $\Delta h = 18.6 \text{ см} - 10.6 \text{ см} = 8 \text{ см}$ .

Давление на уровне верха правом сосуде  $P_2 = \frac{mg}{S_2}$ , где  $m$ - масса груза.

На том же уровне в левом сосуде  $P_1 = \frac{\rho S_1 \Delta h g}{S_1} = \rho \Delta h g$ , где  $\rho$  – плотность воды.

Поскольку давление воды на одной высоте в обеих частях соединяющихся сосудов должны совпадать,  $P_1 = P_2$ , поэтому  $S_2 = \frac{m}{\rho \Delta h}$ .

Получаем  $S_2 = 187.5 \text{ см}^2$

Аналогичным образом измеряем площадь сечения левого сосуда.

**Часть 5. Масса куба1.**

**Часть 6. Масса куба2.**

Задача является обратной к предыдущей: при известной площади сечения сосуда масса  $m$  тела, поставленного на правый поршень, находится по формуле  $m = \rho \Delta h S_2$

### **Задание 9. На каком расстоянии от заряда остановится тело? (8 баллов)**

На горизонтальной шероховатой поверхности закреплен заряд  $q_1 = 3 \text{ мкКл}$ . Тело массы  $m = 100 \text{ г}$ , имеющее заряд  $q_2 = 2 \text{ мкКл}$ , может перемещаться по поверхности. На каком расстоянии  $L$  от заряда тело остановится, если в начальный момент оно покоилось и находилось на расстоянии  $L_0 = 30 \text{ см}$  от закрепленного заряда? Коэффициент трения равен  $\mu = 0.2$ . Постоянная в законе Кулона равна  $k = 9 \cdot 10^9 \text{ м/Ф}$ ,  $g = 9.8 \text{ м/с}^2$ .

Ответ вводить с точностью до десятых. Вычисления проводить с точностью до 4 значащих цифр.

Введите ответ:

Расстояние от заряда  $L = \underline{\hspace{2cm}}$  см

**Сложность задания:** высокая. С ним справилось в полном объеме с первой попытки 16 участников, а в конечном итоге 34 участника из 277 участников, пытавшихся решить задачу. По-видимому, большинству просто не хватило времени на решение этой задачи, так как она не содержит каких-либо особо сложных элементов и находится на уровне заданий части С ЕГЭ.

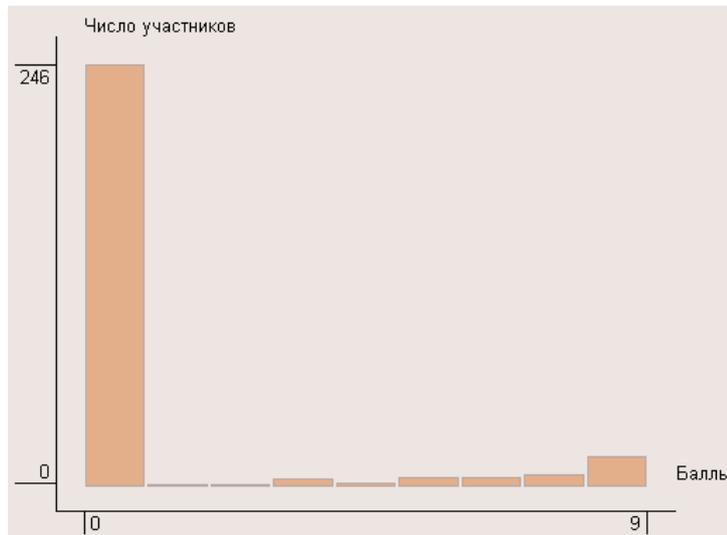


Рис.9 Гистограмма распределения количества участников по числу набранных баллов

**Решение:**

По условию  $k \frac{q_1 q_2}{L_0^2} > \mu mg$ , поэтому тело сдвинется с места. Используя соотношение для начальной и конечной энергии  $W_2 - W_1 = A_{тр}$ , где

$$W_2 = k \frac{q_1 q_2}{L},$$

$$W_1 = k \frac{q_1 q_2}{L_0},$$

$$A_{тр} = -\mu mg(L - L_0)$$

получаем:

$$k \frac{q_1 q_2}{L_0} = k \frac{q_1 q_2}{L} + \mu mg(L - L_0),$$

откуда следует, что

$$\mu mg L^2 - (\mu mg L_0 + k \frac{q_1 q_2}{L_0})L + k q_1 q_2 = 0.$$

Решая это квадратное уравнение, учитывая условие  $k \frac{q_1 q_2}{L_0^2} > \mu mg$  и выбирая корень не равный  $L_0$ , находим:

$$L = k \frac{q_1 q_2}{\mu mg L_0}$$

### Задание 10. До какой температуры надо нагреть газ в трубке? (16 баллов)

Нижний конец вертикальной узкой трубки длины  $2L$  (в мм) запаян, а верхний открыт в атмосферу. В нижней половине трубки находится газ при температуре  $24^\circ\text{C}$ , а верхняя ее половина заполнена ртутью. Внешнее давление в миллиметрах ртутного столба равно  $L$ .

- На сколько градусов  $\Delta t$  надо нагреть газ, чтобы нижний уровень ртути поднялся на  $h=L/20$  ?
- До какой минимальной температуры  $t$  надо нагреть газ в трубке, чтобы он вытеснил всю ртуть?

Ускорение свободного падения считать равным  $9.8 \text{ м/с}^2$ . Значение  $\Delta t$  вводить с точностью до сотых градуса, значение  $t$  - с точностью до градуса.

Вычисления проводить с точностью до 4 значащих цифр.

Введите ответ:

$\Delta t = \underline{\hspace{1cm}}^\circ\text{C}$   
 $t = \underline{\hspace{1cm}}^\circ\text{C}$

**Сложность задания:** очень высокая. С ним справилось в полном объёме с первой попытки 2 участника, а в конечном итоге 7 участников из 115 участников, пытавшихся решать задачу.

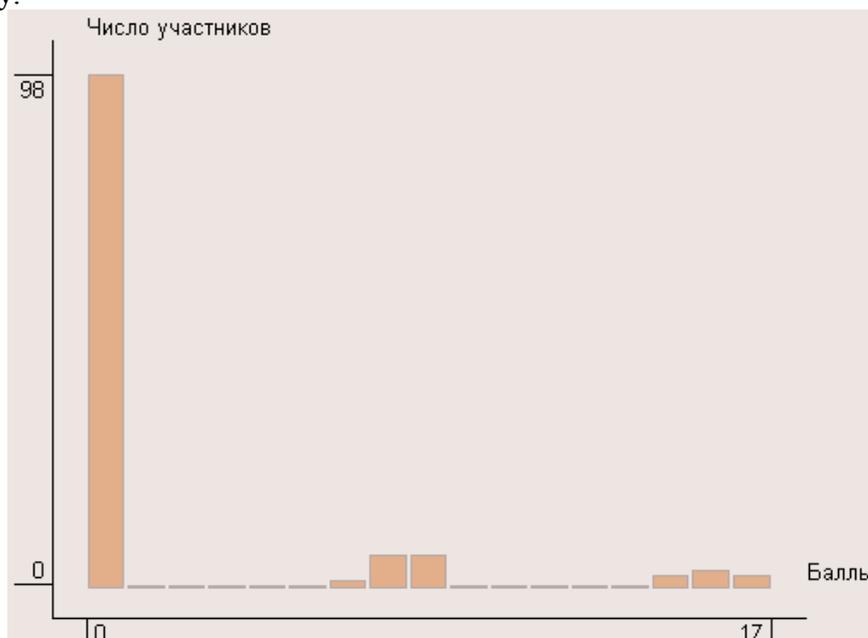


Рис.10 Гистограмма распределения количества участников по числу набранных баллов

**Решение:**

**Часть 1.** На сколько градусов  $\Delta t$  надо нагреть газ, чтобы нижний уровень ртути поднялся на  $h=L/20$

Первоначальный объём газа  $V_1=L S$ , где  $S$  – поперечное сечение трубки. При этом давление газа в трубке  $P_1=P_{\text{внешнее}}+P_{\text{ртути}}=2\rho gL$ .

После нагревания трубки на  $\Delta t$  градусов и установления равновесия имеем

$$V_2=(L+h)S,$$

$$P_2=\rho gL+\rho g(L-h)=\rho g(2L-h)$$

Но  $P_1 V_1 = \frac{m}{\mu} RT_1$  и  $P_2 V_2 = \frac{m}{\mu} RT_2$ . Следовательно,  $\frac{T_2}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{P_1 V_1}$

$$T_2 = \frac{P_2 V_2}{P_1 V_1} T_1,$$

$$\Delta t = T_2 - T_1 = \left( \frac{P_2 V_2}{P_1 V_1} - 1 \right) T_1 = \left( \frac{\rho g (2L - h)(L + h) S}{2 \rho g L S} - 1 \right) T_1 = \left( \frac{(2 - h/L)(1 + h/L)}{2} - 1 \right) T_1$$

$$\Delta t = \frac{h(1 - h/L)}{2L} T_1$$

**Часть 2.** До какой минимальной температуры  $t$  надо нагреть газ в трубке, чтобы он вытеснил всю ртуть

Пусть  $x$  - высота столба ртути после нагревания. Тогда  $P_2 = \rho g(L+x)$ ,  $V_2 = (2L-x)S$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{P_1 V_1}, \text{ т.е. } \frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}, \text{ т.е. } \frac{2 \rho g L^2 S}{T_1} = \frac{\rho g (L+x)(2L-x)}{T_2},$$

поэтому  $2 \frac{T_2}{T_1} L^2 = 2L^2 - Lx + 2Lx - x^2$

$$x^2 - Lx + 2L^2 \left( \frac{T_2}{T_1} - 1 \right) = 0$$

$$x = L \frac{1 \pm \sqrt{1 - 8 \left( \frac{T_2}{T_1} - 1 \right)}}{2}$$

Пусть  $T_2 = T_1$ , тогда  $x = L \frac{1 \pm 1}{2} = L$

Следовательно, знак “+”, т.е.

$$x = L \frac{1 + \sqrt{1 - 8 \left( \frac{T_2}{T_1} - 1 \right)}}{2}$$

При увеличении температуры  $T_2$  подкоренное значение уменьшается. При достижении им значения 0 дальнейшее повышение температуры приводит к состоянию, когда решений нет – из-за того, что выталкивание ртути газом из трубки оказывается слишком сильным, и вся ртуть выливается.

Таким образом, искомое значение  $T_2$  находится из уравнение  $1 - 8 \left( \frac{T_2}{T_1} - 1 \right) = 0$ , т.е.

$$T_2 = \frac{9}{8} T_1$$