

# Республиканская физическая олимпиада 2016 год. (III этап)

## Экспериментальный тур 9 класс

### Задание 9-1. Вытекание из бутылки.

Приборы и оборудование: штатив с лапкой, пластиковая бутылка с завинчивающейся пробкой, в которую вставлены две трубки, секундомер с памятью этапов, мензурка, посуда с водой, линейка.

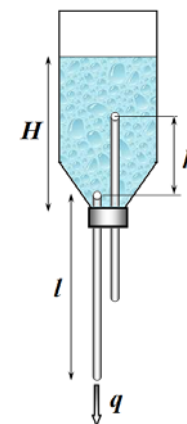
**Рассчитывать погрешности в данной работе не требуется!**

Каждому приходилось проводить эксперимент по выливанию жидкости из перевернутой бутылки. Течение жидкости в этом случае является крайне регулярным – волны, брызги... и бульканье! Действительно, что бы жидкость вытекала из бутылки, внутрь ее должен попадать воздух. В данной задаче Вам предстоит исследовать регулярное вытекание воды из пластиковой бутылки. Для этого сквозь пробку бутылки пропущены две одинаковые трубки, которые можно передвигать. Бутылка закрепляется вертикально в лапке штатива, для измерения объема используется мензурка, для измерения времени вытекания секундомер.

В качестве основной характеристики скорости вытекания используется расход жидкости (объем жидкости, вытекающей в единицу времени):

$$q = \frac{\Delta V}{\Delta t}. \quad (1)$$

В работе также используйте следующие обозначения (см. рисунок):  $H$  - высота уровня воды в сосуде;  $l$  - длина трубки;  $h$  - разность высот уровней трубок внутри сосуда.



#### Часть 1. Закон вытекания.

*Измерения в данной части проведите при разности уровней трубок в сосуде  $h = 5,5\text{ см}$*

- 1.1 Экспериментально исследуйте зависимость объема вытекшей жидкости от времени  $V(t)$ , постройте график полученной зависимости.
- 1.2 Предложите простую формулу, описывающую полученную зависимость. Найдите их численные значения, объясните их физический смысл.
- 1.3 На основании полученной зависимости, укажите, можно ли считать расход жидкости  $q$  не зависящим от высоты уровня воды  $H$  в бутылке.
- 1.4 Дайте качественное объяснение полученной зависимости.

#### Часть 2. От чего зависит расход?

В данной работе используйте основной вывод Части 1, позволяющий рассчитывать расход по «одной точке» - измерять время вытекания  $t$  фиксированного объема жидкости (например  $V = 100\text{ мл}$ ).

- 2.1 Исследуйте зависимость расхода вытекающей жидкости  $q$  от разности уровней трубок  $h$ . Постройте график полученной зависимости.
- 2.2 Предложите простую формулу, описывающую полученную зависимость. Найдите их численные значения, объясните их физический смысл.
- 2.3 Дайте качественное объяснение полученной зависимости и численных значений ее параметров (хотя бы некоторых).

## Задание 9-2. Правду ли нам говорят?

**Приборы и материалы:** источник питания 4,5 В, амперметр стрелочный 2А, вольтметр стрелочный 6В, пять последовательно соединенных проволочных резисторов с неизвестным сопротивлением  $R_1$ , пять последовательно соединенных резисторов с известным сопротивлением (сопротивление каждого примерно  $R_2 \approx 10 \text{ кОм}$ , точное значение укажут организаторы), ключ, соединительные провода.

### Часть 1. Чему равен нуль?

*У идеального амперметра собственное сопротивление равно нулю. А у реального?*

Для измерения сопротивлений амперметра и проволочного резистора  $R_1$  соберите цепь, показанную на рис. 1. В данной цепи напряжение на источнике не остается постоянным, поэтому его необходимо измерять. Амперметр последовательно подключайте к точкам 0, 1, 2, ...5.

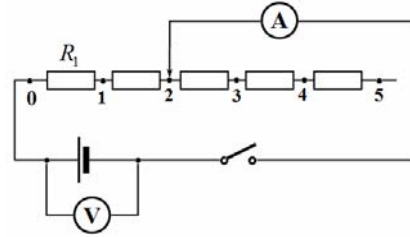


Рис. 1

**Ключ замыкайте только во время проведения измерений!**

- 1.1 Измерьте зависимости напряжения на вольтметре  $U_n$  и силы тока через амперметр  $I_n$  от номера точки подключения  $n$ .
- 1.2 Получите теоретическую зависимость силы тока  $I_n$  от напряжения  $U_n$  и номера точки подключения  $n$ .
- 1.3 Укажите такую функцию  $Z_n(U_n, I_n)$  от величин  $U_n$  и  $I_n$ , чтобы ее зависимость от номера точки подключения  $n$  была линейной. Постройте график зависимости  $Z_n(n)$ .
- 1.4 Используя полученный график, найдите сопротивление амперметра  $R_A$  и сопротивление проволочного резистора  $R_1$ . Оцените погрешности найденных значений.

### Часть 2. Чему равна бесконечность?

*У идеального вольтметра собственное сопротивление равно бесконечности. А у реального?*

Для измерения сопротивления вольтметра  $R_V$  соберите цепь, показанную на рис. 2. В данной цепи напряжение на источнике остается практически постоянным, поэтому измерять его постоянно нет необходимости. Вольтметр последовательно подключайте к точкам 0, 1, 2, ...5.

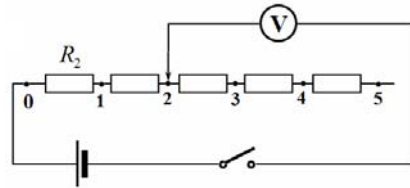


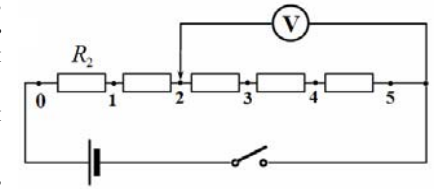
Рис. 2

- 2.1 Измерьте зависимость напряжения на вольтметре  $U_n$  от номера точки подключения  $n$ .
- 2.2 Получите теоретическую зависимость напряжения  $U_n$  и номера точки подключения  $n$ .
- 2.3 Укажите такую функцию  $Z_n(U_n)$  от величины  $U_n$ , чтобы ее зависимость от номера точки подключения  $n$  была линейной. Постройте график зависимости  $Z_n(n)$ .

- 2.4 Используя полученный график, найдите сопротивление вольтметра  $R_V$ , оцените погрешность полученного значения.

### Часть 3. Что Вы поняли?

- 3.1 Видоизмените цепь, превратив ее в цепь, показанную на рис.3. Измерьте зависимость напряжения на вольтметре  $U_n$  от номера точки подключения  $n$ .
- 3.2 Получите теоретическую зависимость напряжения  $U_n$  и номера точки подключения  $n$ .
- 3.3 Постройте зависимость функции  $Z_n(U_n)$ , введенной в п. 2.3, от номера точки подключения  $n$  для данной цепи. На этом же графике постройте аналогичную теоретическую зависимость. Сравните полученные графики.



## Решения задач

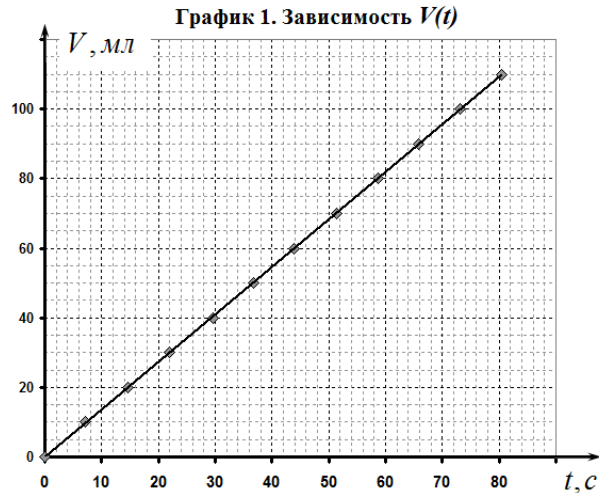
### Задание 9.1 Вытекание из бутылки.

#### Часть 1. Закон вытекания.

1.1 Результаты измерений зависимости объема вытекающей жидкости  $V(t)$  от времени приведены в таблице 1 и на графике 1. Измерения проведены при разности уровней трубок в сосуде  $h = 5,5 \text{ см}$

Таблица 1.

$V, \text{мл}$	$t, \text{сек}$
0	0,00
10	7,11
20	14,58
30	22,02
40	29,54
50	36,76
60	43,81
70	51,29
80	58,66
90	65,75
100	73,18
110	80,37



1 Данная зависимость с высокой степенью точностью является прямо пропорциональной вида

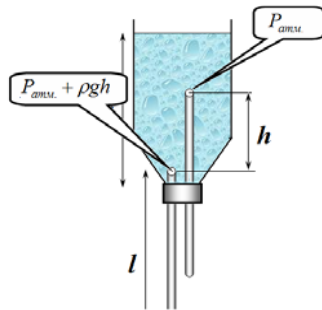
$$V = qt. \quad (1)$$

Коэффициент пропорциональности имеет очевидный смысл расхода жидкости  $q = \frac{\Delta V}{\Delta t}$ . Его численное значение в данном случае можно определить по наклону графика, он равен

$$q = 1,37 \frac{\text{мл}}{\text{с}}.$$

1.3 Так полученная зависимость линейна, то скорость вытекания является постоянной, не смотря на то, что в процессе вытекания уровень жидкости в сосуде  $H$  заметно изменяется.

1.4 Разумно предположить, что скорость вытекания определяется разностью давлений на концах трубки, через которую вытекает вода. Давление воды на верхнем срезе верхней трубки примерно равно атмосферному давлению. Поэтому давление на нижнем уровне нижней трубки остается постоянным и не зависящим от уровня жидкости в бутылке.



#### Часть 2. От чего зависит расход?

2.1 В таблице 2 показаны результаты измерений зависимости времени вытекания  $t$  жидкости объемом  $V_0 = 100 \text{ мл}$  от разности уровней трубок  $h$ . Измерения проведены дважды (от участников достаточно одной серии измерений). Расход рассчитан по формуле

$$q = \frac{V_0}{\langle t \rangle}, \text{ где } \langle t \rangle - \text{среднее время вытекания при заданном значении } h. \text{ График зависимости } q(h)$$

показан на рисунке.

Таблица 2.

$h, \text{мм}$	$t_{1, \text{с}}$	$t_{2, \text{с}}$	$\langle t \rangle, \text{с}$	$q, \frac{\text{мл}}{\text{с}}$
55	73,18	72,02	72,60	1,38
45	76,06	75,32	75,69	1,32
35	81,8	81,51	81,66	1,22
25	91,36	87,81	89,59	1,12
15	96,31	95,58	95,95	1,04
5	105,64	107,04	106,34	0,94

Полученная зависимость является линейной, но не прямо пропорциональной. Она описывается функцией  $q = ah + b$

Параметры этой зависимости, найденные из графика равны

$$a = 8,9 \cdot 10^{-3} \frac{\text{мл}}{\text{с} \cdot \text{мм}},$$

$$b = 0,90 \frac{\text{мл}}{\text{с}}.$$

Данную зависимость удобно представить в виде

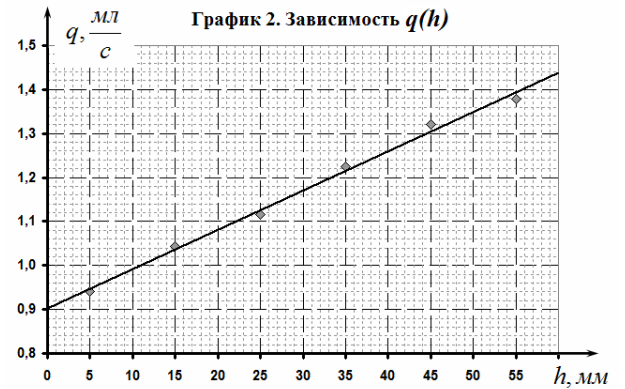
$$q = ah + b = a(h + l')$$

В такой записи параметр  $l' = \frac{b}{a} \approx 10 \text{ см}$ .

Полученная зависимость качественно объясняется следующим образом: расход жидкости пропорционален разности давлений на концах трубки, которая примерно равна гидростатическому давлению столба воды высотой  $h + l$ , где  $l$  - длина трубки. Отличие полученного значения  $l'$  от длины трубки  $l \approx 6 \text{ см}$  объясняется дополнительным давлением, создаваемым струей вытекающей воды (тем самым увеличивается эффективная длина трубки).

Параметрам  $a$  и  $b$  в зависимости (2) также можно приписать определенный физический смысл:  $b$  - расход жидкости при  $h = 0$ , в этом случае разность давлений создается только жидкостью в трубке, через которую течет вода. Такой эксперимент можно провести, в этом случае нельзя заранее предсказать, через какую из двух трубок потечет вода.

$a$  - расход жидкости через трубку, если разность давлений на ее концах создается водяным столбом в 1 мм.



(3)

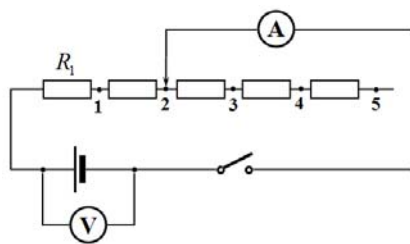
## Задание 9-2. Правду ли нам говорят?

### Часть 1. Чему равен нуль?

1.1 Результаты измерений зависимостей напряжения на вольтметре  $U_n$  и силы тока через амперметр  $I_n$  от номера точки подключения  $n$  приведены в Таблице 1. Также в ней приведены и результаты расчетов, которые требуются в последующих пунктах этой части задания.

Таблица 1.

$n$	$I_n, \text{A}$	$U_n, \text{В}$	$U_n / I_n, \text{Ом}$
0	0,45	1,55	3,444
1	0,25	2,45	9,800
2	0,20	2,70	13,500
3	0,15	2,95	19,667
4	0,11	3,09	28,091
5	0,10	3,20	32,000



1.2 Из закона Ома следует, что сила тока в цепи равна

$$I_n = \frac{U_n}{nR_1 + R_A} \quad (1)$$

1.3 Из этой формулы следует, что отношение  $Z_n = \frac{U_n}{I_n}$  линейно зависит от номера точки подключения.

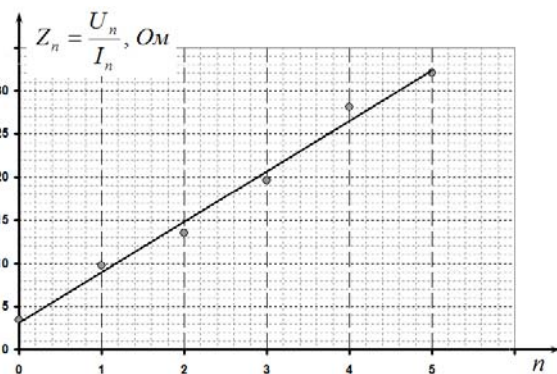
$$\frac{U_n}{I_n} = nR_1 + R_A \quad (2)$$

График данной зависимости показан на рисунке.

Из вида функции (2) следует, что коэффициент наклона графика равен сопротивлению  $R_1$ , а его сдвиг сопротивлению амперметра  $R_A$ . Из данного графика находим

$$R_A = 3,2 \text{ Ом}, \quad R_1 = 5,8 \text{ Ом}$$

Погрешности данных значений также могут быть оценены графически (либо другим способом). В любом случае они оказываются не менее  $\Delta R \approx 1,5 \text{ Ом}$ .

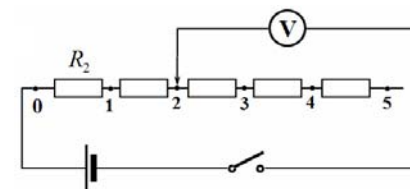


### Часть 2. Чему равна бесконечность?

2.1 Результаты измерений зависимости напряжения на вольтметре  $U_n$  от номера точки подключения  $n$  приведены в Таблице 2.

Таблица 2.

$n$	$U_n, \text{В}$	$U_n / U_0$
0	4,50	1,00
1	1,60	2,81
2	0,95	4,74
3	0,70	6,43
4	0,55	8,18
5	0,45	10,00



2.2 Для получения теоретической зависимости напряжения  $U_n$  и номера точки подключения  $n$  запишем закон Ома для данной цепи

$$I_n = \frac{U_0}{nR_2 + R_V} \quad (3)$$

Из этой формулы следует, что измеряемое напряжение на вольтметре определяется формулой

$$U_V = R_V \frac{U_0}{nR_2 + R_V} = \frac{U_0}{n \frac{R_2}{R_V} + 1} \quad (4)$$

2.3 Из полученного выражение следует, что величина  $Z_n = \frac{U_n}{U_V}$  линейно зависит от номера точки подключения:

$$\frac{U_n}{U_V} = n \frac{R_2}{R_V} + 1. \quad (5)$$

График этой функции показан на рисунке. Сдвиг прямой с высокой точностью равен 1, что подтверждает применимость формулы (5), коэффициент наклона прямой примерно равен  $k = \frac{\Delta Z}{\Delta n} \approx 1,8$ . Из формулы (5) следует, что этот коэффициент равен отношению  $\frac{R_2}{R_V}$ .

Это позволяет найти значение сопротивления вольтметра (в наших измерениях использовались резисторы  $R_2 = 11 \text{ кОм}$ ):

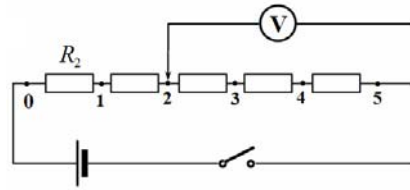
$$\frac{R_2}{R_V} = k \Rightarrow R_V = \frac{R_2}{k} = 6,1 \text{ кОм}. \quad (6)$$

### Часть 3. Что Вы поняли?

3.1 Экспериментальная зависимость напряжения на вольтметре  $U_n$  от номера точки подключения  $n$  приведена в Таблице 3.

Таблица 3.

$n$	$U_n, \text{В}$	$U_n/U_0$	$(U_n/U_0)$ Теор.
0	4,45	1,01	1,00
1	1,45	3,10	3,08
2	0,85	5,29	5,33
3	0,55	8,18	7,99
4	0,35	12,86	12,32
5	0,00		



3.2 Для расчета теоретической зависимости запишем соотношения для токов и напряжений:

$$U_0 = InR_2 + U_V, \quad (7)$$

Здесь  $I$  - сила тока через источник, которая равна сумме сил токов через вольтметр и параллельную ему цепь

$$I = \frac{U_V}{R_V} + \frac{U_V}{(5-n)R_2}. \quad (8)$$

Из этих уравнений следует, что измеряемое напряжение равно

$$U_V = \frac{U_0}{\frac{5}{5-n} + n \frac{R_2}{R_V}}. \quad (9)$$

3.3 В соответствии с полученной формулой величина  $Z_n = \frac{U_n}{U_V}$  описывается формулой

$$\frac{U_0}{U_V} = \frac{5}{5-n} + n \frac{R_2}{R_V}. \quad (10)$$

Результаты расчетов этой величины (экспериментальной и теоретической) приведены в таблице 3. Графики полученных зависимостей показаны на следующем рисунке (кружки – экспериментальные значения, сплошная линия теоретическая зависимость). Видно хорошее соответствие между полученными данными. Незначительные отклонения объясняются неизбежными погрешностями измерений.

