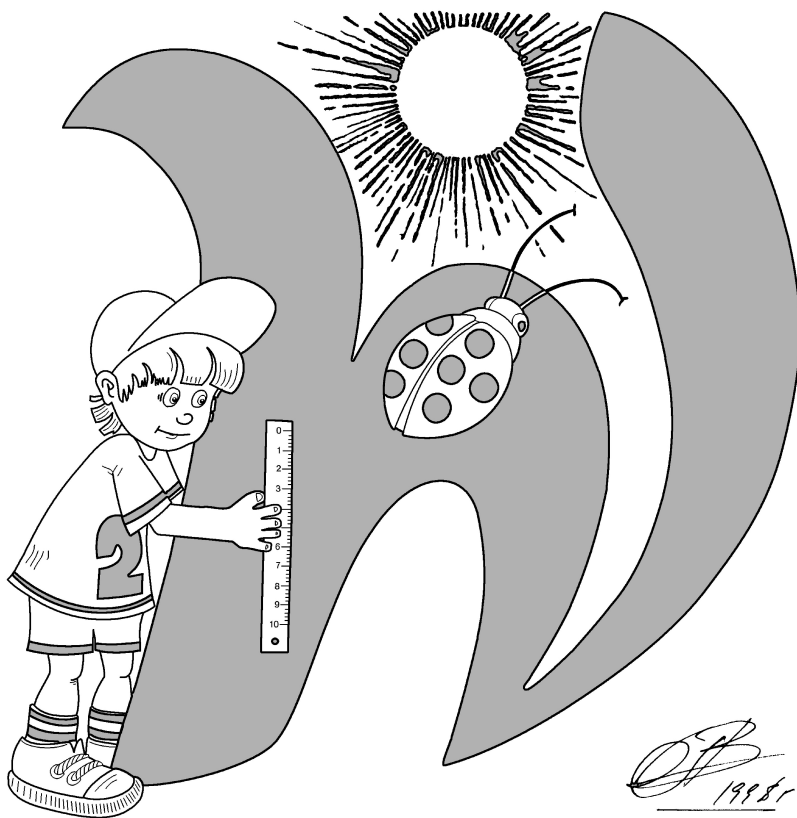


Министерство просвещения Российской Федерации  
Центральная предметно-методическая комиссия  
Всероссийской олимпиады школьников по физике

# ЛIX Всероссийская олимпиада школьников по физике

Заключительный этап  
Экспериментальный тур



Новый Уренгой, 2026 г.

Комплект задач подготовлен  
центральной предметно-методической комиссией  
Всероссийской олимпиады школьников по физике  
E-mail: [physolymp@gmail.com](mailto:physolymp@gmail.com)

## Авторы задач

### Экспериментальный тур

#### 9 класс

- **9-Е1.** Сергей Кармазин
- **9-Е2.** Александр Аполонский, Ярослав Агеев

#### 10-11 класс

- **10-Е1.** Алексей Заяц
- **11-Е1.** Юрий Черников

## 9 класс

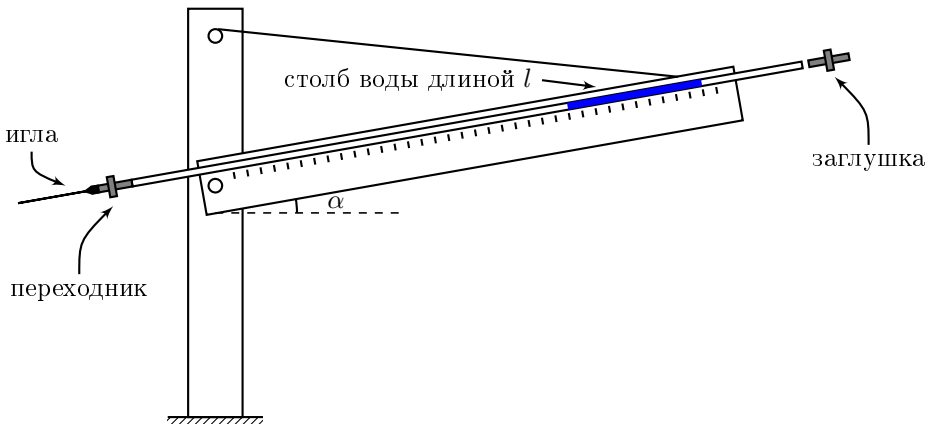
### Задача №1. Вязкость воздуха

Для поддержания стационарного течения газа в трубе необходимо создавать постоянную разность давлений на её концах. При этом разность сил давления компенсирует силы внутреннего трения между слоями газа. Характеристикой этих сил трения является коэффициент вязкости  $\eta$ . При ламинарном течении газа (без завихрений) объёмный расход  $Q$  — объём, протекающий через поперечное сечение цилиндрической трубы в единицу времени — определяется формулой Пуазейля:

$$Q = \frac{\pi r^4 \Delta P}{8L\eta},$$

где  $r$  — внутренний радиус трубы,  $L$  — её длина,  $\Delta P$  — разность давлений на концах трубы.

В данной работе требуется определить коэффициент вязкости воздуха при комнатной температуре с помощью установки, схематически изображенной на рисунке.



В качестве трубы используется игла шприца, которая соединена через переходник с трубкой ПВХ, закреплённой в пазе длинной деревянной рейки. При движении столбика воды длиной  $l$  вдоль наклонённой под углом  $\alpha$  трубки между его концами возникает разность давлений  $\Delta P$ . В стационарном режиме движение происходит с постоянной скоростью  $v$ . Составляющая силы тяжести вдоль трубки уравновешивается разностью сил давления воздуха и некоторой силой  $F_0$ :

$$mg \sin \alpha = \Delta P S + F_0,$$

где  $S$  — площадь поперечного сечения трубки ПВХ,  $m$  — масса воды.

1. Определите площадь  $S$  поперечного сечения трубки ПВХ.
2. Снимите экспериментальную зависимость скорости движения столбика воды  $v$  от  $\sin \alpha$  для двух его длин:

$$45 \text{ мм} \leq l \leq 55 \text{ мм}, \quad 75 \text{ мм} \leq l \leq 85 \text{ мм}.$$

Для каждого значения угла наклона выполните не менее трёх измерений времени движения столбика и определите среднюю скорость. Получите не менее 5 точек зависимости  $v(\sin \alpha)$  для каждой длины  $l$ .

3. Постройте графики зависимостей  $v(\sin \alpha)$  в одних координатных осях.
4. Используя предложенную модель, получите теоретическую зависимость скорости  $v$  от  $\sin \alpha, r, L, \rho, S, l, \eta, F_0, g$ .
5. По результатам эксперимента определите коэффициент вязкости воздуха  $\eta$ .
6. Оцените величину силы  $F_0$ .

В работе используйте следующие предположения и константы:

- для малых перепадов давления плотность воздуха считайте постоянной;
- течение воздуха в игле ламинарное;
- столбик воды считайте цилиндрическим;
- силу  $F_0$  считайте постоянной и не зависящей от угла наклона;
- радиус трубки ПВХ значительно больше радиуса иглы;
- внутренний радиус и длина иглы шприца  $r = 0,17$  мм и  $L = 35$  мм соответственно;
- плотность воды  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;
- ускорение свободного падения  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup>.

#### Примечание

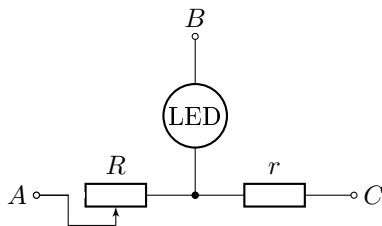
1. Будьте внимательны при работе с иглами шприца. Игла, используемая в качестве трубы, должна быть без защитного футляра. Иглу шприца, предназначенного для заполнения трубки водой, после использования необходимо закрывать футляром.
2. Следите, чтобы столбик воды не выходил за пределы участка трубки ПВХ, закреплённого на рейке.
3. Для удаления оставшихся капель воды продувайте трубку со стороны её длинного (левого) конца. Перед этим снимите иглу с переходника и продезинфицируйте конец трубки. При продувке влажным воздухом из лёгких внутреннего поверхность трубки может запотевать, что изменяет параметры течения жидкости. Для высушивания трубки втягивайте сухой воздух через трубку из комнаты в лёгкие.
4. Для остановки движения столбика воды вставляйте заглушку в короткий (правый) конец трубки.
5. Запрещается делать пометки на линейках.

**Оборудование:** установка в сборе; трубочина; игла; заглушка (помеченная красным); шприц объёмом 2 мл с иглой; стакан с водой; секундомер; линейка; дезинфицирующая салфетка; салфетки для поддержания чистоты; масштабнокординатная бумага для построения графиков.

**Оценивать погрешность в этой задаче не требуется.**

### Задача №2. Три в одном

Внутри серого ящика находятся три элемента: светодиод (LED), переменный резистор  $R$  и постоянный резистор  $r$ , соединённые по схеме, показанной на рисунке. Сопротивление переменного резистора может изменяться в пределах от  $R_{\min}$  до  $R_{\max}$ . Ручка регулировки  $R$  и светодиод выведены наружу серого ящика.



1. Установите соответствие между выводами 1, 2, 3 на ящике и выводами  $A, B, C$  на схеме.

2. Определите полярность включения светодиода.

3. Найдите значения сопротивлений  $r, R_{\min}$  и  $R_{\max}$ .

4. Измерьте вольт-амперную характеристику светодиода в прямом направлении.

5. Постройте график полученной вами вольт-амперной характеристики. Оценка погрешностей при выполнении этого пункта не требуется.

**Оборудование:** серый ящик; отвёртка для регулировки сопротивления переменного резистора; макетная плата; соединительные провода; мультиметр (в режиме вольтметра и омметра) с щупами; держатель для батареек; две батарейки типа ААА; масштабнокординатная бумага для построения графика.

- **Комплект для измерений не разбирать!**
- **Во избежание разряда батарейки не держите цепь замкнутой, когда не производите измерений!**
- **Режимом амперметра пользоваться запрещено!**
- **Для мультиметра примите погрешность прямого измерения равной 3 единицам последнего разряда, но не менее 1 процента от измеряемой величины.**

## 10 класс

## Задача №1. Тёмное пятно

**Оборудование:** лазерная указка (крепится к штативу с помощью прищепки); цилиндрический сосуд № 1 с прямоугольной пластиной; цилиндрический сосуд № 2 с круглой пластиной внутри; пластиковая линейка с длиной шкалы 8 см; стакан с неизвестной жидкостью; стакан с водой; шприц объёмом 22 мл; ламинированный шаблон, на который нанесена шкала; миллиметровая бумага для построения графика (3 листа); салфетки для поддержания чистоты.

- **Неизвестную жидкость не пить!**
- **При случайном попадании небольшого количества жидкости в рот прополощите его большим количеством воды.**
- **При контакте с кожей неизвестная жидкость опасности не представляет.**
- **Не светить лазером в глаза себе и окружающим!**

1.1. Возьмите сосуд № 1. Если на дно сосуда налить слой жидкости и посветить на него сверху лазером, можно увидеть следующую картину (см. фото 1).

Предложите теоретическую модель образования тёмного пятна и выведите теоретическую зависимость диаметра  $D$  пятна от толщины слоя  $h$  жидкости и показателя преломления  $n_{\text{ж}}$  жидкости. При выводе считайте, что дно сосуда плоское и горизонтальное.

1.2. Наливая в сосуд № 1 воду, экспериментально исследуйте зависимость диаметра  $D$  тёмного пятна от объёма  $V$  воды в сосуде. Снимите не менее 7 точек в диапазоне  $V \geq 50$  мл.

1.3. Повторите эксперимент, описанный в предыдущем пункте, взяв вместо воды неизвестную жидкость (НЖ). Снимите не менее 7 точек в диапазоне  $V \geq 50$  мл.

1.4. Постройте в общей системе координат графики полученных в пп. 1.2 и 1.3 зависимостей. С помощью графиков определите показатель преломления  $n_{\text{нж}}$  неизвестной жидкости. Оцените погрешность полученного значения. Здесь и далее показатель преломления воды примите равным  $n_{\text{в}} = 1,334 \pm 0,001$ .

2.1. Возьмите сосуд № 2. Если посветить лазером на пластину, можно увидеть картину, аналогичную фото 1. Измерьте диаметр  $D_0$  тёмного пятна в данном случае.

**В задании 2.1 жидкость внутрь сосуда наливать не нужно!**

2.2. Если пластина покрыта слоем жидкости, то картина меняется (см. фото 2). Предложите теоретическую модель и выведите теоретическую зависимость диаметра  $D$  тёмного пятна от толщины  $d$  пластины, высоты  $h$  слоя жидкости

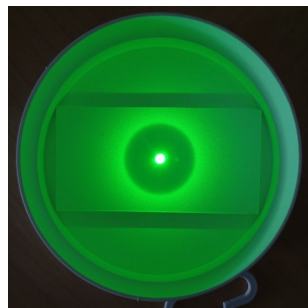


Фото 1

относительно пластины и показателей преломления материала пластины  $n_{пл}$  и жидкости  $n_{ж}$ . При выводе зависимости считайте, что  $n_{пл} > n_{ж}$ .

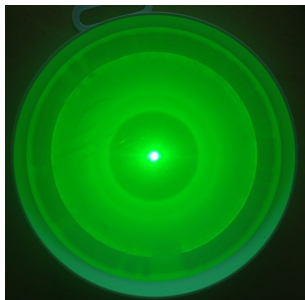


Фото 2

2.3. Наливая воду в сосуд № 2, экспериментально исследуйте зависимость диаметра  $D$  тёмного пятна от объёма  $V$  воды. Снимите не менее 10 точек в диапазоне  $V \geq 80$  мл.

2.4. Постройте график зависимости диаметра  $D$  тёмного пятна, образующегося в пластине (см. пп. 2.1 и 2.3), от объёма  $V$  налитой воды в диапазоне  $0 \leq V \leq 200$  мл.

2.5. При наличии у графика особых точек (изломов, максимумов, минимумов и т.п.), укажите их координаты.

2.6. С помощью графика, построенного в п. 2.4, определите: а) показатель преломления материала пластины; б) толщину пластины. Оцените погрешности полученных значений.

3.1. Возьмите ламинированный шаблон и аккуратно налейте на его поверхность слой воды. Следите за тем, чтобы вода не достигала границы шаблона! Посветите на получившийся слой воды лазером. Измерьте диаметр  $D_k$  получившегося тёмного пятна. Используя формулу из п. 1.1, вычислите толщину  $h$  слоя воды. Оцените погрешность полученного значения.

3.2. Вычислите краевой угол  $\theta$  (угол смачивания) поверхности шаблона водой, ответ приведите в угловых градусах. Оцените погрешность полученного значения. При вычислениях считайте, что

- коэффициент поверхностного натяжения воды  $\sigma = (72 \pm 1)$  мН/м;
- плотность воды  $\rho_v = (997 \pm 2)$  кг/м<sup>3</sup>;
- ускорение свободного падения  $g = (9,81 \pm 0,02)$  м/с<sup>2</sup>.

## 11 класс

## Задача №1. Веретено

## Оборудование:

1. мотор с редуктором,
2. колесо, надевающееся на ось ведомого вала редуктора,
3. шкив с отверстием под леску,
4. лабораторный источник питания,
5. два мультиметра со щупами,
6. отрезок изоленды,
7. соединительные провода крокодил-крокодил 3 шт,
8. соединительные провода банан-крокодил 2 шт,
9. секундомер,
10. леска длиной около 1,5 м (замена лески при необходимости производится только один раз),
11. набор грузов (5 г, 10 г, 25 г, 36 г, 50 г),
12. рулетка,
13. штатив с лапкой и муфтой,
14. ножницы,
15. защитные очки,
16. струбцина,
17. пассатижи для затягивания узлов на леске.



**Внимание!**

1. Для измерения тока и напряжения используйте мультиметры. Показания измерительных блоков источника питания имеют большую погрешность.
2. Не фиксируйте вал мотора при напряжениях его питания более 1 В. Это может привести к его выходу из строя.
3. Не пропускайте через мультиметр в режиме 200 мА ток более 200 мА. Это может привести к перегоранию предохранителя внутри мультиметра и выходу из строя режима амперметра.
4. Используйте только ручки регулировки напряжения на источнике питания.

**Задание.****Часть 1.**

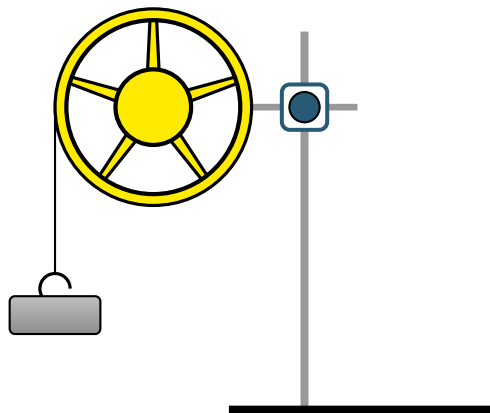
1.1. Зафиксируйте вал мотора и подайте на него напряжение, приблизительно равное 0,5 В. Измерьте значение силы тока, текущего через мотор, и напряжение на нем. Рассчитайте сопротивление обмоток мотора. Проведите измерения при 5 разных положениях вала мотора. Усредните полученные значения. Зарисуйте схему подключения измерительных приборов.

1.2. Наденьте колесо на вал редуктора. Подайте на мотор с надетым редуктором напряжение, превышающее  $U_{\min} = 0,7$  В, но не более  $U_{\max} = 4,5$  В. Измерьте для семи различных значений поданного напряжения ток, текущий через мотор, и частоту вращения колеса, приводимого в движение редуктором.

1.3. Рассчитайте значение ЭДС индукции мотора для каждой из измеренных точек и постройте график зависимости частоты вращения колеса от ЭДС индукции мотора. Какой функцией описывается измеренная зависимость? Аппроксимируйте экспериментальные точки данной функцией и рассчитайте ее коэффициенты (или коэффициент).

1.4. Привяжите к колесу леску. Используйте для этого два просверленных отверстия в колесе. Подайте напряжение на мотор, так чтобы колесо редуктора вращалось. Измерьте силу тока  $I$ , текущего через мотор. Остановите мотор. Привяжите к концу лески грузик массой 50 г. Подайте то же самое напряжение на мотор. Если ограничение силы тока источника питания не позволяет привести в движение колесо, подтолкните его рукой. Измерьте силу тока  $I'$ , текущего через мотор в этом случае. Рассчитайте разность измеренных сил тока  $\Delta I = I' - I$ . Проведите данный эксперимент для нескольких значений поданного напряжения и усредните измеренные разности тока.

1.5. Рассчитайте отношение  $\beta$  момента силы (относительно оси вращения), действующего на колесо со стороны груза, к приращению силы тока  $\Delta I$ . Определите теоретически, какой должна быть эта величина  $\beta_{theor}$ , если ее рассчитать из коэффициента(-ов), найденного(-ых) в пункте 1.3. В теоретических расчетах предполагайте, что момент силы трения в редукторе не зависит от скорости вращения мотора и нагрузки на нем. Сравните полученные значения  $\beta$  и  $\beta_{theor}$ .



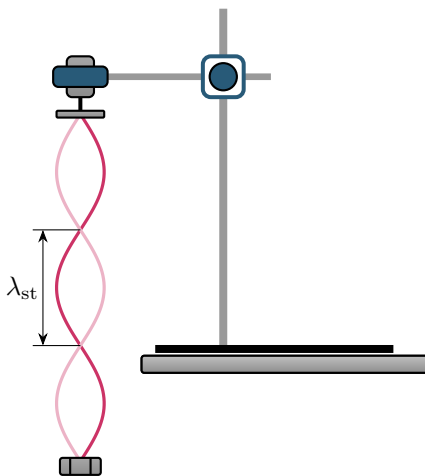
Мотор с редуктором.

1.6. Редуктор, прикрепленный к мотору, вращает колесо с частотой в  $n$  раз меньшей частоты вращения основного вала мотора. Измерьте коэффициент редукции  $n$ . Подробно объясните метод измерения.

**Часть 2.**

**Внимание! Эту часть задачи выполняйте в защитных очках!**

Снимите с мотора редуктор. Поменяйте шестерню, надетую на вал, на шкив с отверстием. Шестерню можно аккуратно снять с помощью пассатижей. Закрепите мотор в лапке штатива так, чтобы вал мотора занимал вертикальное положение, а шкив находился ниже корпуса мотора. Привяжите к шкиву леску длиной приблизительно  $l = 100$  см. К концу лески прикрепите груз массой  $m = 5,0$  г. Пункты 2.1 – 2.4 выполняйте с этим грузом. Подайте на мотор напряжение. Шкив придет во вращение. При некоторых частотах вращения вала леска будет принимать стационарную форму с некоторым количеством узлов и пучностей. Будем называть длиной стоячей волны  $\lambda_{st}$  расстояние между двумя соседними узлами.



Стоячая волна.

**Внимание:** если Вы не смогли измерить коэффициент редукции, то во второй части задачи примите его равным  $n_1 = 25$ .

2.1. При некоторых различных частотах вращения вала мотора леска будет принимать форму стоячей волны с разным количеством  $N$  пучностей. Добейтесь максимума амплитуды стоячей волны для каждого значения  $N = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ . Определите частоты  $\nu$  вращения вала мотора в этих состояниях.

*Примечание:* возможно, наблюдения будет более удобно вести на фоне белого листа бумаги.

2.2. Согласно теории стоячих волн, при резонансе на расстоянии между двумя закрепленными концами лески должно укладываться целое число длин стоячих волн  $\lambda_{st}$  (или, что то же самое, целое число половин длин волн  $\lambda$  бегущих волн):

$$L_0 = N\lambda_{st} = N\frac{\lambda}{2}.$$

Построив график зависимости  $\nu(N)$ , проверьте это теоретическое предсказание.

2.3. Измерьте зависимость длины стоячей волны от частоты вращения вала мотора. При данных измерениях не обязательно попадать именно в резонансные частоты, существенным обстоятельством является стационарная форма лески при ее вращении. В каких координатах зависимость является линейной функцией? Проверьте ваше предположение графически.

Рассчитайте скорость распространения поперечных волн по леске. Не забудьте, что длина стоячей волны  $\lambda_{st}$  в два раза меньше длины бегущей волны  $\lambda$ .

2.4. Скорость распространения поперечных волн  $v$  зависит от погонной плотности  $\rho$  лески и ее силы натяжения  $T$  как:

$$v = A\rho^i(T + T_0)^j,$$

где  $T_0$  — постоянная сила, отвечающая за изгибную жесткость лески, численный коэффициент  $A$  равен единице.

Методом размерности получите величины  $i$  и  $j$ .

2.5. Проведите аналогичные пункту 2.3 измерения для оставшихся грузов. Найдите резонансные частоты вращения для  $N = 1, 2, 3$ . Определите скорости распространения волн по леске при разных силах натяжения.

Постройте необходимые зависимости на одном графике.

*Примечание:* при измерениях частоты вращения вала для случая трех пучностей на леске, натянутой грузом 25 г, могут возникнуть трудности. Для того, чтобы добиться устойчивого вращения лески, слегка придержите ее на расстоянии 2 – 3 см от места подвеса груза.

2.6. Постройте график зависимости  $v$  от  $m$  в координатах, в которых он должен быть линейной функцией. Рассчитайте по угловому коэффициенту графика значение погонной плотности лески и величину  $T_0$ .

## Возможные решения

### Задача №9-Е1. Вязкость воздуха

Столбик воды в трубке можно считать цилиндрическим, поэтому его объём  $V$  и длина  $l$  связаны соотношением  $V = Sl$ , откуда

$$S = \frac{V}{l}.$$

Экспериментальные данные по объёму и длине столбика приведены в таблице.

$V$ , мм <sup>3</sup>	$l$ , мм	$S$ , мм <sup>2</sup>
500	42	11,9
1000	88	11,4
1500	131	11,5
2000	171	11,7

Используя несколько измерений, усредняем результаты:

$$S \approx 11,6 \text{ мм}^2.$$

Для измерения угла наклона выберем на прикреплённой к рейке линейке два деления на известном расстоянии  $b$  (в авторском эксперименте  $b = 250$  мм) друг от друга. Измеряя высоты этих точек над столом  $h_1$  и  $h_2$ , получаем

$$\sin \alpha = \frac{h_2 - h_1}{b}.$$

Скорость движения столбика определяется по формуле

$$v = \frac{s}{t},$$

где  $s$  — пройденное расстояние столбика,  $t$  — время движения. Для каждого угла наклона производим не менее трёх измерений и вычисляем среднюю скорость  $v_{\text{ср}}$ .

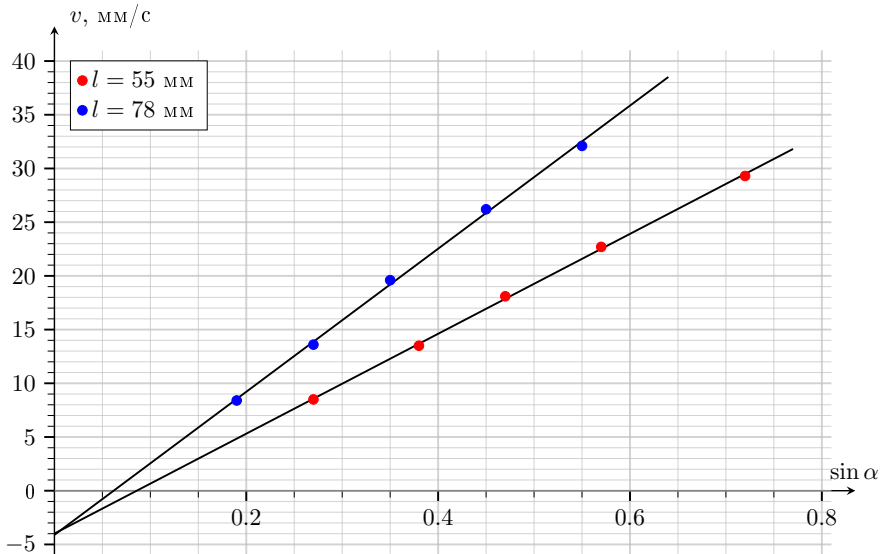
В таблице приведены результаты измерений для столбика воды длиной  $l = 55$  мм.

№	$h_1$ , мм	$h_2$ , мм	$\sin \alpha$	$s$ , мм	$t$ , с	$v$ , мм/с	$v_{\text{ср}}$ , мм/с
1	165	232	0,27	150	17,22	8,7	8,5
				200	23,69	8,4	
				250	29,85	8,4	
2	187	281	0,38	150	11,25	13,3	13,5
				200	14,84	13,5	
				250	18,44	13,6	
3	205	323	0,47	150	8,33	18,0	18,1
				200	10,93	18,3	
				250	13,81	18,1	
4	227	369	0,57	150	6,66	22,7	22,7
				200	8,81	22,5	
				300	13,16	22,8	
5	257	436	0,72	250	8,53	29,3	29,3
				250	8,43	29,6	
				300	10,32	29,1	

Для столбика воды длиной  $l = 78$  мм:

№	$h_1$ , мм	$h_2$ , мм	$\sin \alpha$	$s$ , мм	$t$ , с	$v$ , мм/с	$v_{cp}$ , мм/с
1	149	195	0,19	150	17,72	8,5	8,4
				200	23,91	8,4	
				250	29,85	8,4	
2	165	232	0,27	150	10,97	13,7	13,6
				200	14,60	13,7	
				250	18,48	13,5	
3	183	270	0,35	150	7,54	19,9	19,6
				200	10,31	19,4	
				250	12,87	19,4	
4	202	315	0,45	150	5,71	26,3	26,2
				200	7,65	26,1	
				250	9,62	26,0	
5	223	360	0,55	200	6,24	32,1	32,1
				250	7,82	32,0	
				300	9,31	32,2	

Построим графики  $v(\sin \alpha)$  для двух разных длин столбика  $l$ .



Масса столбика воды:

$$m = \rho l S.$$

В установившемся режиме выполняется равенство сил вдоль оси трубки:

$$\rho l S g \sin \alpha = \Delta P S + F_0.$$

По условию для малых перепадов давления плотность воздуха считаем постоянной, следовательно объёмный расход воздуха через иглу связан со скоростью движения воды:

$$Q = v S.$$

Согласно формуле Пуазейля:

$$\Delta P = \frac{8L\eta Q}{\pi r^4} = \frac{8L\eta v S}{\pi r^4}.$$

Подставляя в уравнение сил:

$$\rho l S g \sin \alpha = \frac{8L\eta v S^2}{\pi r^4} + F_0.$$

Отсюда выражаем скорость:

$$v = \frac{\rho l g \pi r^4}{8L\eta S} \sin \alpha - \frac{F_0 \pi r^4}{8L\eta S^2}.$$

Видно, что зависимость  $v(\sin \alpha)$  должна быть линейной с угловым коэффициентом

$$k = \frac{\rho l g \pi r^4}{8L\eta S}$$

и пересечением с вертикальной осью

$$v_0 = -\frac{F_0 \pi r^4}{8L\eta S^2}.$$

Из углового коэффициента графика:

$$k = \frac{\rho l g \pi r^4}{8L\eta S} \Rightarrow \eta = \frac{\rho l g \pi r^4}{8LkS}.$$

Подстановка экспериментальных данных для  $l = 55$  мм даёт

$$\eta \approx 9,3 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Из пересечения графика с вертикальной осью  $v_0 \approx -4,0$  мм/с:

$$F_0 = \frac{8L\eta S^2}{\pi r^4} |v_0| \approx 0,53 \cdot 10^{-3} \text{ Н}.$$

### Задача №9-Е2. Три в одном

Измерим сопротивления между парами выводов 1–2, 1–3 и 2–3, изменяя полярность подключения омметра и вращая ручку переменного резистора. При изменении полярности омметра сопротивление в ветви со светодиодом резко изменяется: в одном направлении прибор показывает конечное сопротивление, а в противоположном — очень большое (разрыв цепи). Это позволяет определить вывод, к которому подключен светодиод.

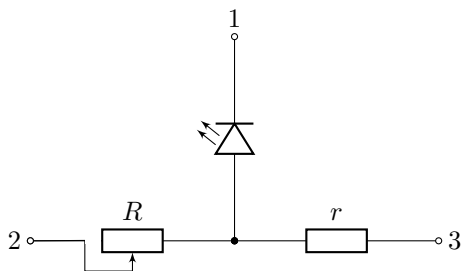


Рис. 1

Если при вращении ручки переменного резистора измеряемое сопротивление между двумя выводами изменяется, то соответствующая ветвь содержит переменный резистор  $R$ . Ветвь, сопротивление которой не зависит от положения ручки переменного резистора, содержит резистор  $r$ . Сопоставляя результаты измерений для всех трёх пар выводов, можем однозначно определить, какой элемент

подключён к каждому выводу, и установить соответствие между выводами 1, 2, 3 серого ящика и выводами  $A, B, C$  на схеме. Выданные в оборудовании батарейки соединены последовательно с помощью колодки. Далее в решении будем данное последовательное соединение батареек называть просто батарейкой. Подключим батарейку к паре выводов 1–2. Изменяя полярность и сопротивление переменного резистора, можно обнаружить, что при подключении положительной клеммы батарейки к выводу 1 светодиод не горит ни при каких сопротивлениях переменного резистора. При подключении «плюса» батарейки к выводу 2 обнаружим, что светодиод горит и его яркость изменяется с сопротивлением переменного резистора. Это возможно тогда и только тогда, когда эта пара выводов соответствует паре выводов  $A$ – $B$ . Вывод  $C$  однозначно соответствует выводу 3. Подключим батарейку к паре выводов 1–3. Изменяя полярность, обнаружим, что при подключении «плюса» батарейки к выводу 1 светодиод не горит. При подключении положительной клеммы батарейки к выводу 3 светодиод горит, его яркость при этом не зависит от сопротивления переменного резистора. Таким образом, вывод 1 однозначно соответствует выводу  $B$ , от которого идёт светодиод. Вывод  $A$  соответствует выводу 2 по методу исключения.

$$A - 2; B - 1; C - 3.$$

Полярность светодиода определяется по направлению тока, при котором омметр показывает конечное сопротивление. В этом направлении ток проходит от анода к катоду светодиода (см. рисунок 1). Ранее было обнаружено, что светодиод горит, если ток через него проходит к выводу 1. Значит, «плюс» светодиода находится снизу (см. рисунок 1).

Известно, что светодиод имеет монотонно возрастающую вольт-амперную характеристику, причём до определённого момента сила тока через светодиод пренебрежимо мала, а затем начинает значительно расти (и в этой ситуации светодиод горит). Подключим «плюс» батарейки к выводу 3, «минус» батарейки к выводу 1 (см. рисунок 2). Подключим вольтметр в режиме 2000 мВ к выводам 2–3 и измерим напряжение  $U_V$ :

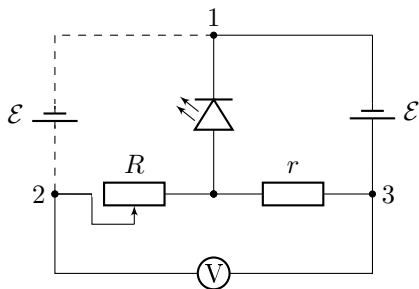


Рис. 2

$$U_V = (1137 \pm 11) \text{ мВ}.$$

С высокой точностью вольтметр можно считать идеальным. В таком случае можно считать, что через резистор  $R$  ток не протекает, и  $U_V$  — это напряжение на резисторе  $r$ . Запишем второе правило Кирхгофа для контура, через который течёт

ток:

$$\varepsilon = U(I) + U_V,$$

где  $U(I)$  — напряжение на светодиоде,  $I$  — сила тока. В соответствии с законом Ома для резистора  $r$  также справедливо следующее:

$$U_V = Ir.$$

Подключим «плюс» батарейки к выводу 2, «минус» батарейки к выводу 1 (см. рисунок 2). Не изменяя подключения вольтметра, будем измерять напряжение на той же паре выводов 2–3, но теперь это будет напряжение, падающее на переменном резисторе  $R$ . Запишем правило Кирхгофа аналогично прошлому подключению:

$$\varepsilon = U(I) + U_V.$$

Изменяя сопротивление переменного резистора, можно добиться того, что при некотором сопротивлении  $R'$  измеряемое напряжение будет совпадать с измеренным ранее в пределах погрешности. Измеренное значение:

$$U'_V = (1142 \pm 11) \text{ мВ}.$$

В таком случае на светодиоде также падают одинаковые напряжения, а поскольку  $U(I)$  — строго возрастающая зависимость при свечении светодиода, то и сила тока протекает одинаковая. Тогда  $Ir = IR'$ , откуда следует:

$$r = R'.$$

Отключим батарейку, а мультиметр переведём в режим омметра с пределом измерений 2000 Ом. Показания омметра  $R_\Omega = r + R' = 2r$ . Измерено значение:

$$R_\Omega = (400 \pm 4) \text{ Ом}.$$

Получаем ответ:

$$r = (200 \pm 2) \text{ Ом}.$$

Не меняя подключения омметра, изменим сопротивление переменного резистора до минимального значения. Показания омметра:

$$R_{\Omega 1} = (250 \pm 3) \text{ Ом}.$$

С другой стороны,  $R_{\Omega 1} = r + R_{\min}$ . Получаем ответ:

$$R_{\min} = (50 \pm 4) \text{ Ом}.$$

Провернём переменный резистор до максимального сопротивления. Сменим диапазон работы омметра до  $20\text{ k}\Omega$ . Показания омметра:

$$R_{\Omega 2} = (10,45 \pm 0,11)\text{ кОм}.$$

С другой стороны,  $R_{\Omega 2} = r + R_{\max}$ . Получаем ответ:

$$R_{\max} = (10,25 \pm 0,11)\text{ кОм}.$$

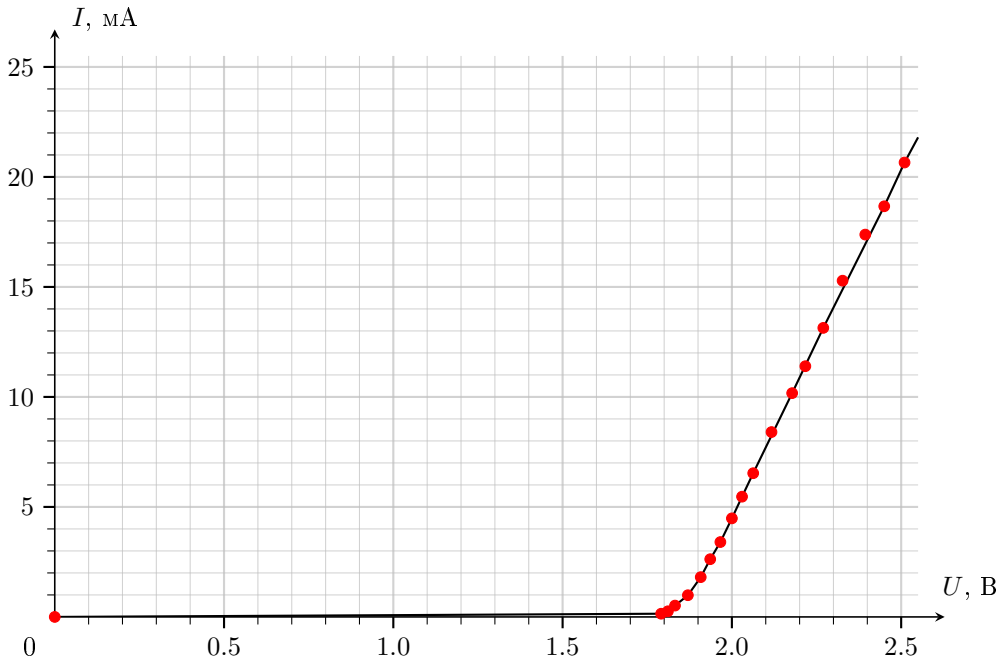
$$r = (200 \pm 2)\text{ Ом}, \quad R_{\min} = (50 \pm 4)\text{ Ом}, \quad R_{\max} = (10,25 \pm 0,11)\text{ кОм}.$$

Немного поворачивая ручку переменного резистора, будем изменять его сопротивление. Для различных сопротивлений переменного резистора выполняем следующие действия:

1. Измеряем омметром сопротивление  $R_{\Omega}$  между выводами 2–3. Диапазон омметра выбираем оптимальный для повышения точности измерений.
2. Подключаем «плюс» батарейки к выводу 2, «минус» батарейки к выводу 1.
3. Измеряем вольтметром напряжение  $U$  между выводами 1–3 (это напряжение на светодиоде). Диапазон вольтметра выбираем оптимальный для повышения точности измерений.
4. Измеряем вольтметром напряжение  $U_V$  между выводами 2–3. В данном случае наиболее оптимальным будет режим с пределом измерений 2000 мВ.
5. Отключаем батарейку.
6. Пересчитываем силу протекающего тока, используя закон Ома для переменного резистора и найденное ранее значение  $r$ :

$$I = \frac{U_V}{R_{\Omega} - r}.$$

$R_{\Omega}$ , кОм	$U$ , В	$U_V$ , мВ	$I$ , мА
10,15	1,791	1449	0,15
5,76	1,811	1429	0,26
2,91	1,832	1398	0,52
1,577	1,870	1360	0,99
0,924	1,908	1312	1,81
0,684	1,936	1274	2,62
0,564	1,966	1244	3,40
0,467	2,000	1203	4,48
0,412	2,030	1167	5,47
0,371	2,063	1127	6,53
0,325	2,117	1063	8,40
0,297	2,178	1002	10,17
0,283	2,217	963	11,40
0,267	2,270	900	13,14
0,236	2,450	700	18,67
0,229	2,510	630	20,66
0,242	2,394	756	17,38
0,253	2,327	833	15,28



### Задача №10-Е1. Тёмное пятно

Поверхность дна сосуда является матовой, поэтому луч лазера, попадающий на неё, рассеивается во все стороны. Лучи, попадающие изнутри на границу жидкости и воздуха под углами, превышающими предельный угол  $\alpha_{кр}$ , отражаются обратно и снова попадают на матовую поверхность дна сосуда, подсвечивая её. В свою очередь, лучи, попадающие на границу жидкость-воздух под углами, меньшими  $\alpha_{кр}$ , преломляются и выходят из жидкости. Справедливости ради стоит отметить, что и для углов падения, меньших  $\alpha_{кр}$ , небольшая часть света отражается обратно, поэтому тёмный круг на дне сосуда несколько подсвечен (см. фото 1 из условия) и не является полностью чёрным.

Найдём диаметр тёмного пятна, для чего построим луч, который после рассеяния света от лазера на дне сосуда падает на границу жидкость-воздух под углом  $\alpha_{кр}$  (см. рис. 1). Из треугольников, показанных на рисунке, следует, что

$$\frac{D}{2} = 2 \cdot h \operatorname{tg} \alpha_{кр}.$$

Поскольку предельный угол, при котором на границе жидкости с воздухом происходит полное внутреннее отражение, определяется формулой  $\sin \alpha_{кр} = 1/n_{ж}$ ,

выражение для диаметра тёмного пятна будет иметь вид

$$D = \frac{4h}{\sqrt{n_{\text{ж}}^2 - 1}}$$

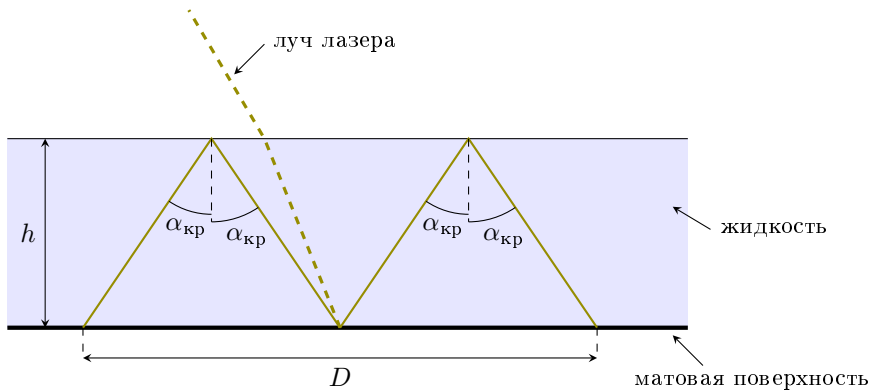


Рис. 1

Поместим в сосуд линейку и, включив лазер, начнём с помощью шприца наливать внутрь воду. Занесём в таблицу результаты измерений.

$V$ , мл	50	65	80	95	110	125	140
$D$ , мм	24	33	42	50	59	68	77

Выльем воду и вытрем дно сосуда и линейку салфеткой. Повторим описанный выше эксперимент с неизвестной жидкостью.

$V$ , мм	50	65	80	95	110	125	140
$D$ , мм	22	30	39	47	55	64	72

На дне сосуда № 1 есть плоская площадка, поэтому теоретическая зависимость диаметра пятна  $D$  от объёма жидкости  $V$  должна иметь вид линейной функции

$$D(V) = \frac{4(V - V_0)}{S\sqrt{n_{\text{ж}}^2 - 1}},$$

где  $S$  — площадь дна сосуда,  $V_0$  — константа, связанная с объёмом пустого места вокруг площадки и объёмом линейки. Отметим на координатной плоскости

точки, полученные в пп. 1.2 и 1.3, и для каждой серии точек проведём аппроксимирующую прямую (рис. 2). Поскольку значение  $S$  неизвестно, будем искать отношение угловых коэффициентов построенных прямых

$$\gamma = \frac{k_B}{k_{HЖ}} = \frac{77,0 - 24,0}{72,0 - 22,0} = 1,06.$$

С другой стороны,

$$\gamma = \sqrt{\frac{n_{HЖ}^2 - 1}{n_B^2 - 1}} \Rightarrow n_{HЖ} = \sqrt{1 + \gamma^2(n_B^2 - 1)} = 1,37.$$

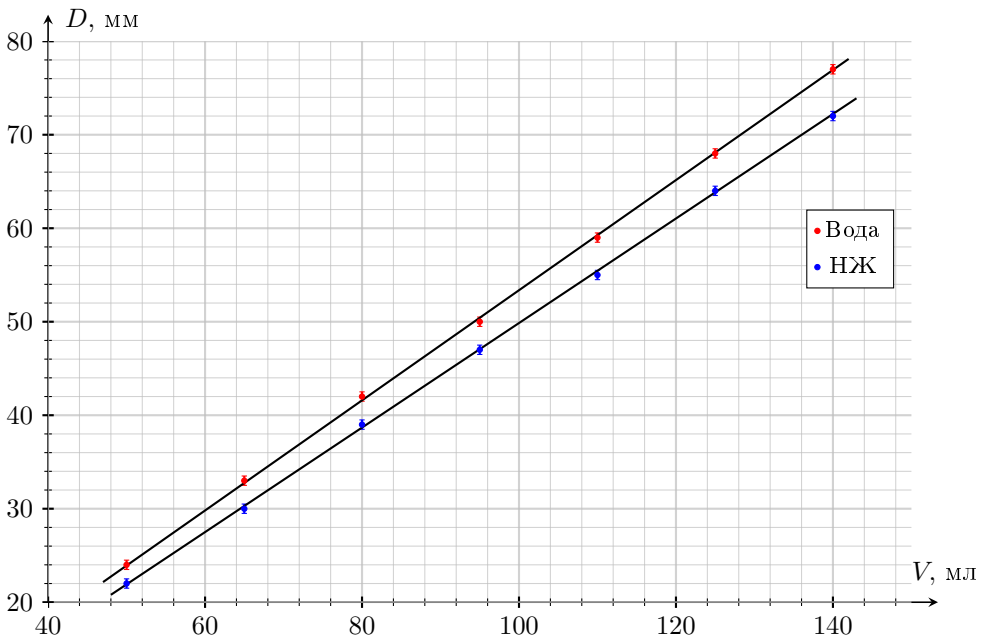


Рис. 2

Оценим погрешность полученного результата:

$$\Delta n_{HЖ} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(n_B^2 - 1)\Delta(\gamma^2) + \gamma^2\Delta(n_B^2)}{n_{HЖ}} = \frac{(n_B^2 - 1)\gamma}{n_{HЖ}} \cdot \Delta\gamma + \frac{\gamma^2 n_B}{n_{HЖ}} \cdot \Delta n_B.$$

Подставляя найденные значения и данные из условия, получим, что второе слагаемое равно 0,001, а первое —  $0,6\Delta\gamma$ . Для нахождения  $\Delta\gamma$  применим метод границ,

считая, что возможное отклонение координат крайних точек составляет 0,5 мм (половину деления координатной сетки):

$$\gamma_{max} = \frac{77,5 - 23,5}{71,5 - 22,5} \approx 1,10, \quad \gamma_{min} = \frac{76,5 - 24,5}{72,5 - 21,5} \approx 1,02 \quad \Rightarrow \quad \Delta\gamma \approx 0,04.$$

Отсюда видно, что второе слагаемое не существенно, и  $\Delta n_{нж} = 0,03$ .

Возьмём сосуд № 2 и, включив лазер, измерим диаметр пятна. Получим, что  $D_0 = 34$  мм.

В данной системе есть две границы (акриловая пластина-жидкость и жидкость-воздух), на которых возможно полное внутреннее отражение. Рассмотрим сначала первый случай — луч падает на границу жидкость-воздух под предельным углом  $\alpha_1$  — и найдём расстояние  $D_1/2$  (см. рис. 3):

$$D_1/2 = 2d \operatorname{tg} \beta_1 + 2h \operatorname{tg} \alpha_1.$$

Перепишем это выражение, учитывая, что

$$\sin \alpha_1 = \frac{1}{n_{ж}}, \quad \sin \beta_1 = \frac{n_{ж} \sin \alpha_1}{n_{пл}} = \frac{1}{n_{пл}},$$

и получим

$$D_1 = \frac{4d}{\sqrt{n_{пл}^2 - 1}} + \frac{4h}{\sqrt{n_{ж}^2 - 1}}. \quad (*)$$

Во втором случае, когда луч испытывает полное отражение от границы акрил-жидкость, расстояние  $D_2/2$  равно

$$D_2/2 = 2d \operatorname{tg} \alpha_2, \quad \text{где } \sin \alpha_2 = n_{ж}/n_{пл}.$$

Откуда, подставляя выражение для угла, получим

$$D_2 = \frac{4d}{\sqrt{(n_{пл}/n_{ж})^2 - 1}}. \quad (**)$$

Диаметру тёмного пятна соответствует меньшее из двух найденных значений. Большее значение определяет диаметр внешнего светлого кольца вокруг тёмного пятна (можно видеть на фото 2 из условия). Таким образом,  $D = \min(D_1, D_2)$ .

Поместим линейку в сосуд № 2 и, включив лазер, начнём с помощью шприца наливать внутрь воду. Занесём в таблицу результаты измерений.

V, мл	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
D, мм	46	51	55	58	63	66	70	73	76	75	75

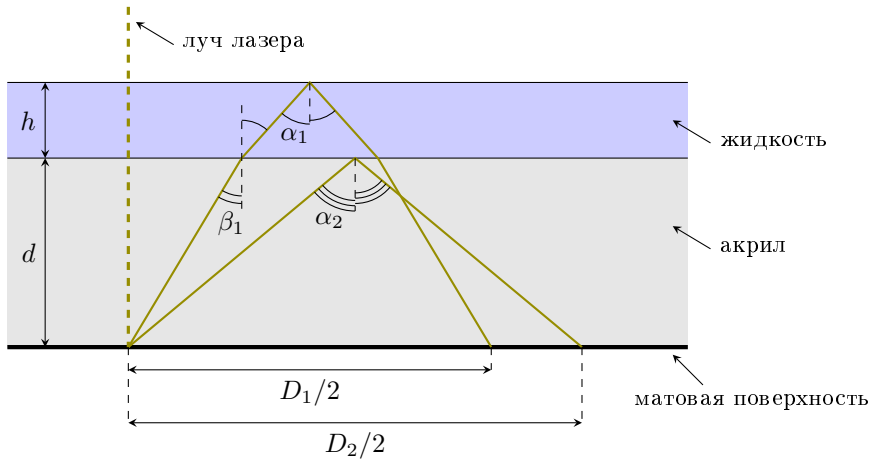


Рис. 3

При малых значениях  $V$  вода занимает пространство между стенками сосуда и пластиной, поэтому при  $V < V_1$  (значение  $V_1$  предстоит найти из графика) диаметр пятна постояен:  $D = D_0 = 34$  мм. Аналогично, при больших значениях  $V$  (когда  $V$  больше некоторого значения  $V_2$ ) диаметр пятна определяется формулой (\*\*), следовательно, также постояен. В интервале  $V_1 < V < V_2$  зависимость  $D(V)$ , согласно (\*), должна быть линейной. Отметим на координатной плоскости точки, полученные в п. 2.3, и построим график, учитывающий особенности, указанные выше (рис. 3).

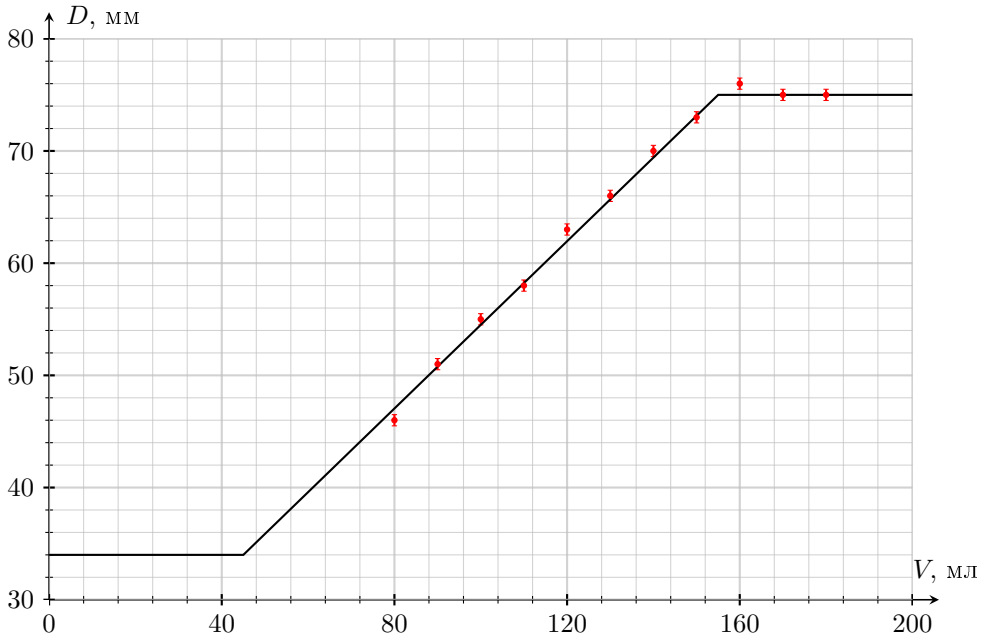


Рис. 3

Построенный график представляет собой ломаную — три прямолинейных участка, два из которых горизонтальны. Вершины ломаной имеют координаты (44 мл; 34 мм) и (155 мл; 75 мм).

Максимальное значение диаметра пятна  $D_2 = 75$  мм, а минимальное —  $D_0 = 34$  мм. Используя формулу, аналогичную полученной в пп. 1.1, запишем

$$D_0 = \frac{4d}{\sqrt{n_{\text{пл}}^2 - 1}},$$

откуда

$$\delta = \frac{D_2^2}{D_0^2} = \frac{n_{\text{пл}}^2 - 1}{n_{\text{пл}}^2/n_{\text{в}}^2 - 1} \Rightarrow n_{\text{пл}} = n_{\text{в}} \sqrt{\frac{\delta - 1}{\delta - n_{\text{в}}^2}}.$$

Так как  $\delta = (75/34)^2 \approx 4,866$ , показатель преломления материала пластины (акрила) равен

$$n_{\text{пл}} = 1,334 \cdot \sqrt{\frac{3,866}{4,866 - 1,780}} \approx 1,49.$$

Толщину пластины определим из формулы для  $D_0$ :

$$d = \frac{D_0}{4} \sqrt{n_{\text{пл}}^2 - 1} = \frac{34 \text{ мм}}{4} \sqrt{1,49^2 - 1} \approx 9,4 \text{ мм.}$$

Оценим теперь погрешности полученных значений.

$$\varepsilon_\delta = 2\varepsilon_{D_0} + 2\varepsilon_{D_2} = \frac{2 \cdot 1 \text{ мм}}{34 \text{ мм}} + \frac{2 \cdot 1 \text{ мм}}{75 \text{ мм}} = 0,08 \Rightarrow \Delta\delta = \delta \cdot \varepsilon_\delta = 0,4.$$

Используя малость погрешности  $n_{\text{в}}$ , вычислим  $\Delta n_{\text{пл}}$ :

$$\varepsilon_{n_{\text{пл}}} = \frac{1}{2} \cdot \left| \frac{1}{\delta - 1} - \frac{1}{\delta - n_{\text{в}}^2} \right| \Delta\delta = 0,012 \Rightarrow \Delta n_{\text{пл}} = n_{\text{пл}} \cdot \varepsilon_{n_{\text{пл}}} = 0,02.$$

Аналогично поступим при нахождении  $\Delta d$ :

$$\varepsilon_d = \varepsilon_{D_0} + \frac{n_{\text{пл}} \Delta n_{\text{пл}}}{n_{\text{пл}}^2 - 1} = 0,055 \Rightarrow \Delta d = d \varepsilon_d \approx 0,5.$$

Возьмём шаблон и выровняем его поверхность, прижав края к столу имеющимся оборудованием (штативом, обоими сосудами). Приложим линейку к шкале, напечатанной на шаблоне, и найдём цену деления этой шкалы:

$$C = \frac{80 \text{ мм}}{105} \approx 0,762 \text{ мм.}$$

Медленно и аккуратно с помощью шприца нальём воду на поверхность шаблона. Получившаяся «лужа» должна быть как можно большего размера (ориентировочно, объём налитой воды  $\approx 80$  мл). Если посмотреть на в отражение в налитой «луже», то по отсутствию искажений можно определить, какая часть её поверхности является плоской. Включим лазер и посветим на шаблон с водой так, чтобы луч падал на поверхность шаблона вплотную к шкале (но не на неё!). Дождавшись прекращения движения границы «лужи», измерим диаметр тёмного пятна

$$D_{\text{к}} = 19 \text{ дел} = 19 \cdot C = 19 \cdot 0,762 \text{ мм} \approx 14,5 \text{ мм,}$$

$$\Delta D_{\text{к}} = 1 \text{ дел} \Rightarrow \varepsilon_{D_{\text{к}}} \approx 6\%.$$

С помощью формулы из п. 1.1 вычислим толщину слоя воды в месте, куда светили лазером:

$$h = \frac{D_{\text{к}}}{4} \sqrt{n_{\text{в}}^2 - 1} \approx 3,2 \text{ мм.}$$

Так как  $\varepsilon_{n_{\text{в}}} \ll \varepsilon_h$ , относительные погрешности  $h$  и  $D_{\text{к}}$  равны, поэтому

$$\Delta h = h \cdot \varepsilon_h = 0,2 \text{ мм.}$$

Горизонтальный размер «лужи» много больше её толщины  $h$ , поэтому верхняя поверхность воды является практически плоской. Это даёт возможность связать толщину слоя воды с углом смачивания, рассматривая задачу как двумерную. Рассмотрим маленький участок слоя жидкости шириной  $L$  и условие её равновесия в проекции на горизонтальную ось  $x$  (силы, действующие на этот участок в горизонтальном направлении, изображены на рис. 4):

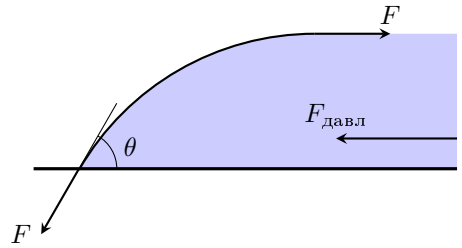


Рис. 4

$$0 = F \cos \theta - F + p_{\text{ср}} L h = \sigma L \cos \theta - \sigma L + \frac{\rho_{\text{в}} g L h^2}{2},$$

где  $F = \sigma L$  — сила поверхностного натяжения,  $p_{\text{ср}} = \rho_{\text{в}} g h / 2$  — среднее по высоте гидростатическое давление.

Выражая отсюда  $h$ , получим

$$h = \sqrt{\frac{2\sigma(1 - \cos \theta)}{\rho_{\text{в}} g}} = 2\sqrt{\frac{\sigma}{\rho_{\text{в}} g}} \sin \frac{\theta}{2}.$$

Вычислим теперь значение угла  $\theta$ :

$$\theta = 2 \arcsin \left( \frac{h}{2} \sqrt{\frac{\rho_{\text{в}} g}{\sigma}} \right) = 2 \arcsin(0,58) = 72^\circ.$$

Оценим относительную погрешность аргумента арксинуса  $A = 0,5h\sqrt{\rho_{\text{в}} g / \sigma}$ :

$$\varepsilon_A = \varepsilon_h + 0,5(\varepsilon_\sigma + \varepsilon_{\rho_{\text{в}}} + \varepsilon_g) = 7,8\%.$$

Откуда

$$\Delta\theta = \frac{180^\circ}{\pi} \cdot \frac{2A\varepsilon_A}{\sqrt{1 - A^2}} \approx 6^\circ.$$

### Задача №11-Е1. Веретено

Для питания мотора будем использовать регулируемый блок питания. Подключим также амперметр и вольтметр для точного измерения тока и напряжения.

Зафиксируем вал мотора. Подадим на него напряжение и измерим показания приборов. Рассчитаем сопротивление обмоток мотора:

$$R = \frac{U}{I}$$

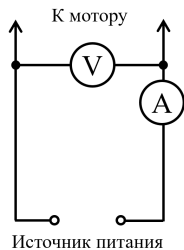


Схема питания мотора.

Повторим измерения для разного положения вала мотора и усредним значения. Видно, что значения мало отличаются друг от друга. Однако, можно заметить, что при некоторых положениях мотора получаются совершенно другие значения. В этих положениях коллектор мотора находится в положении переключения между обмотками. Приборная погрешность измерения напряжения и тока составляет 1% от измеряемой величины, тогда погрешность сопротивления составит 2%. На фоне приборной погрешности случайная погрешность измерения сопротивления мала. Таким образом, сопротивление обмоток мотора составит:

$$R = (6,14 \pm 0,12) \text{ Ом.}$$

$U$ , В	$I$ , мА	$R$ , Ом
0,500	81,6	6,13
0,504	81,9	6,15
0,504	82,0	6,15
0,496	80,6	6,15
0,502	81,7	6,14

Закрепим мотор с подключенным редуктором в лапке штатива. На колесе редуктора сделаем отметку, наклеив небольшой кусок изолянт. Подадим напряжение на мотор большее  $U_{min}$ , мотор станет вращаться. Измерим силу тока, текущего через мотор, и время совершения колесом  $k$  оборотов. Повторим процедуру для 7 возможных значений подаваемого напряжения. Занесем данные в таблицу.

$t$ , с	$k$	$I$ , мА	$U$ , В	$U_{ind}$ , В	$f$ , Гц	$\sigma_{U_{ind}}$ , В	$\sigma_f$ , Гц
16,94	5	0,740	50,8	0,43	0,295	0,02	0,005
11,81	5	1,018	53,2	0,69	0,423	0,02	0,011
14,34	10	1,504	58,5	1,14	0,697	0,03	0,015
9,87	10	2,05	57,7	1,70	1,013	0,03	0,031
15,47	20	2,54	64,8	2,14	1,293	0,04	0,025
11,91	20	3,03	71,2	2,59	1,679	0,04	0,042
19,41	40	3,52	77,3	3,04	2,061	0,05	0,032

Рассчитаем для каждого значения поданного напряжения ЭДС индукции в моторе:

$$U_{ind} = U - IR.$$

Погрешность оценим как:

$$\sigma_{U_{ind}} = \sigma_U + I\sigma_R + R\sigma_I.$$

Также рассчитаем частоту вращения:

$$f = \frac{k}{t}.$$

Погрешность частоты рассчитаем как:

$$\sigma_f = f \frac{\sigma_t}{t},$$

где  $\sigma_t = 0,3$  с — характерное время реакции человека.

Построим график зависимости частоты вращения от ЭДС индукции.

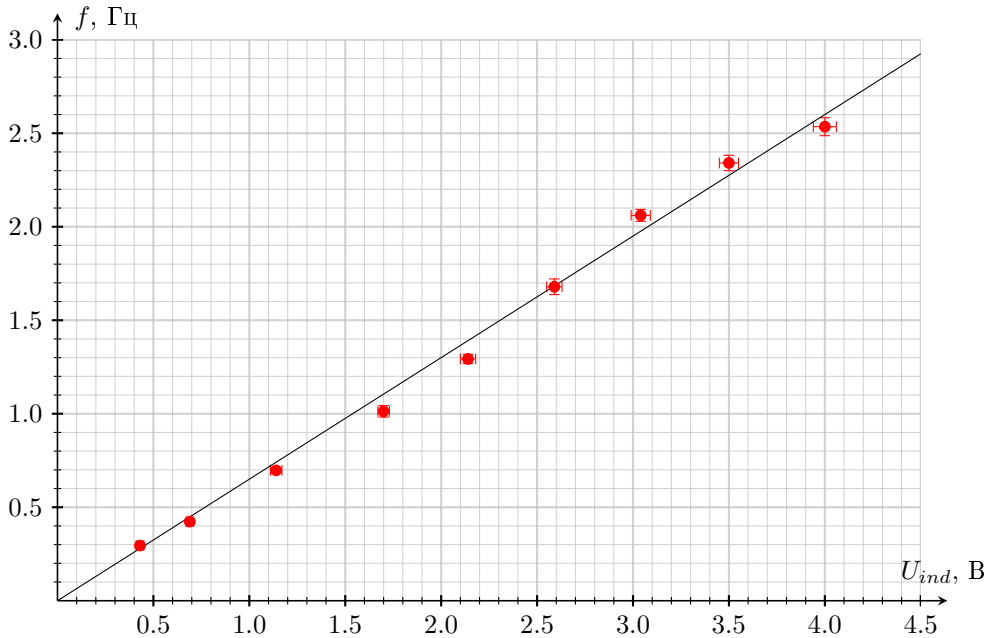


График зависимости частоты вращения колеса от ЭДС индукции мотора.

Видно, что график можно описать прямой пропорциональностью как и предсказывает закон Фарадея. Угловым коэффициентом графика составляет  $\alpha = (0,65 \pm 0,02)$  Гц/В.

Измерим силу тока, текущего через мотор, когда к нему подключен редуктор, не нагруженный грузом. Привяжем к колесу леску, подвесим груз и вновь измерим значение силы тока при том же напряжении на моторе. Рассчитаем разность величин сил тока  $\Delta I$ . Проведем измерения для разных значений напряжения.

$I$ , мА	$I'$ , мА	$\Delta I$ , мА
66	136	70
67	155	88
74	146	72
81	154	73
78	147	69
67	157	90
81	168	87

Усредним полученное значение:

$$\Delta I_{\text{ср}} = (78 \pm 10) \text{ мА.}$$

Измерим диаметр колеса  $D = (6,3 \pm 0,1)$  см. Тогда дополнительный момент сил, действующий на колесо будет равен:

$$M = mg \frac{D}{2} = (1,568 \pm 0,025) \text{ Н} \cdot \text{см.}$$

Погрешность оценим как:

$$\sigma_M = M \frac{\sigma_D}{D}.$$

Рассчитаем отношение момента силы, действующего на колесо, и приращения силы тока:

$$\beta = \frac{M}{\Delta I} = (0,20 \pm 0,03) \text{ Н} \cdot \text{м/А.}$$

Рассчитаем погрешность как:

$$\sigma_\beta = \beta \left( \frac{\sigma_M}{M} + \frac{\sigma_{\Delta I}}{\Delta I} \right).$$

Для вывода соотношения между  $\alpha$  и  $\beta$  запишем второй закон Кирхгофа для мотора:

$$U = IR + U_{\text{ind}} = IR + \frac{f}{\alpha}.$$

Умножим полученное соотношение на силу тока:

$$IU = I^2 R + \frac{If}{\alpha}.$$

Выражение слева представляет полную мощность, поступающую в мотор от источника питания. Часть мощности тратится на тепловыделение в обмотках мотора и выражается как:

$$N_{\text{тепл}} = I^2 R.$$

Оставшееся выражение представляет из себя механическую мощность, которую можно представить как:

$$N_{\text{мех}} = M\omega = 2\pi f M.$$

Или с учетом введенного коэффициента  $\beta$ :

$$N_{\text{мех}} = 2\pi\beta I f.$$

Отсюда теоретическая связь между коэффициентами:

$$\frac{I f}{\alpha} = 2\pi\beta I f.$$

$$\beta_{\text{theor}} = \frac{1}{2\pi\alpha} = (0,245 \pm 0,007) \text{ Н} \cdot \text{м/А}.$$

Погрешность оценим как:

$$\sigma_{\beta_{\text{theor}}} = \beta_{\text{theor}} \cdot \frac{\sigma_{\alpha}}{\alpha}.$$

Заметим, что полученное экспериментально значение  $\beta$  не совпадает с предсказанным теоретически. Скорее всего это связано с тем, что при подвешивании груза меняется момент сил трения в редукторе.

Для измерения коэффициента редукции отключим мотор от источника питания, и подсоединим к валу мотора, выступающему с его тыльной стороны, шкив. Будем вращать шкив и наблюдать за вращением колеса редуктора. Подсчитаем, количество оборотов шкива  $n = 48$ , отвечающее полному обороту колеса редуктора. Именно эта величина и будет являться коэффициентом редукции. На первый взгляд может показаться, что полному обороту колеса соответствует 50 оборотов шкива. Однако, если провести аккуратные измерения и повернуть колесо редуктора таким методом на несколько оборотов, то можно убедиться, что коэффициент редукции равен именно 48.

Снимем редуктор с мотора, поменяем шестерню на вале двигателя на шкив. Привяжем к шкиву леску, на конце которой закрепим груз массой 5 г. Установим мотор так, чтобы шкив оказался в горизонтальной плоскости. Запустим вращение мотора. Добьемся того, чтобы на вращающейся леске наблюдалась одна пучность. Подберем напряжение питания таким образом, чтобы амплитуда в пучности была максимальной. Запишем значения напряжения на моторе и тока текущего через него. Рассчитаем частоту вращения мотора как:

$$\nu = fn = n\alpha(U - IR).$$

Погрешность расчета частоты оценим как:

$$\sigma_\nu = \nu \left( \frac{\sigma_\alpha}{\alpha} + \frac{\sigma_U + I\sigma_R + R\sigma_I}{U - IR} \right)$$

Погрешность тока будем считать равной 1 мА, так как показания амперметра отклоняются от среднего значения с течением времени приблизительно с такой амплитудой. Относительную погрешность измерения напряжения будем считать равной 1%. Проведем следующие опыты так, чтобы на леске наблюдалось несколько пучностей. Занесем данные в таблицу.

$N$	$U$ , В	$I$ , А	$\nu$ , Гц	$\sigma_\nu$ , Гц
1	0,59	54	8,1	0,9
2	0,85	54	16,2	1,2
3	1,23	68	25,3	1,6
4	1,4	65	31,2	1,9
5	2,05	106	43,7	2,6
6	2,46	123	53,2	3,1

Построим график измеренной зависимости.

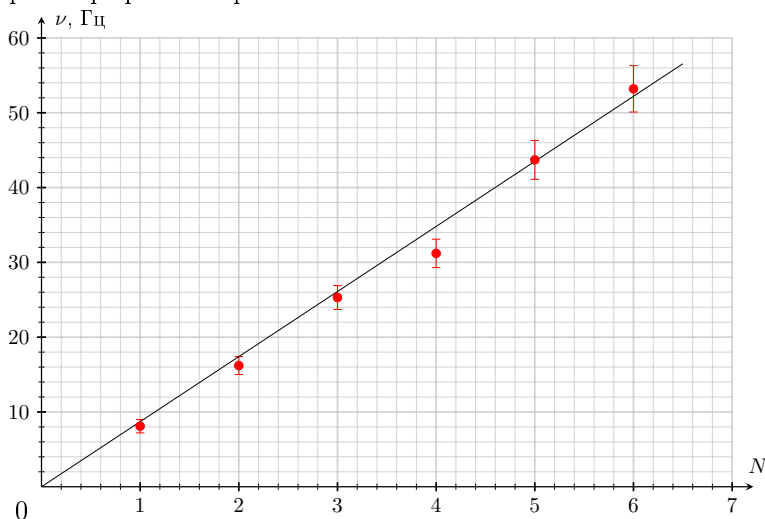


График зависимости резонансной частоты от количества пучностей.

Видно, что график легко описать прямой пропорциональностью. То есть частота вращения прямо пропорциональна количеству пучностей в форме вращения, что подтверждает теоретическое предсказание.

Измерим зависимость длины стоячей волны от частоты вращения вала мотора. При этих измерениях не обязательно попадать в резонансные частоты. Пересчитаем частоты в периоды вращения:

$$T = \frac{1}{\nu}.$$

Погрешности периода рассчитаем как:

$$\sigma_T = T \frac{\sigma_\nu}{\nu}.$$

Погрешность измерения длины полуволны оценим как  $\sigma_{\lambda_{st}} = 1$  см. Построим график зависимости  $\lambda(T)$ .

$\lambda_{st}$ , см	$U$ , В	$I$ , А	$\nu$ , Гц	$\sigma_\nu$ , Гц	$T$ , мс	$\sigma_T$ , мс	$\lambda$ , м
106	0,59	54	8,1	0,9	124	13,4	2,12
53	0,85	54	16,2	1,2	62	4,5	1,06
35	1,23	68	25,3	1,6	39	2,6	0,70
27	1,40	65	31,2	1,8	32	1,9	0,54
21	2,05	106	43,7	2,6	23	1,4	0,42
18	2,46	123	53,2	3,1	19	1,1	0,36

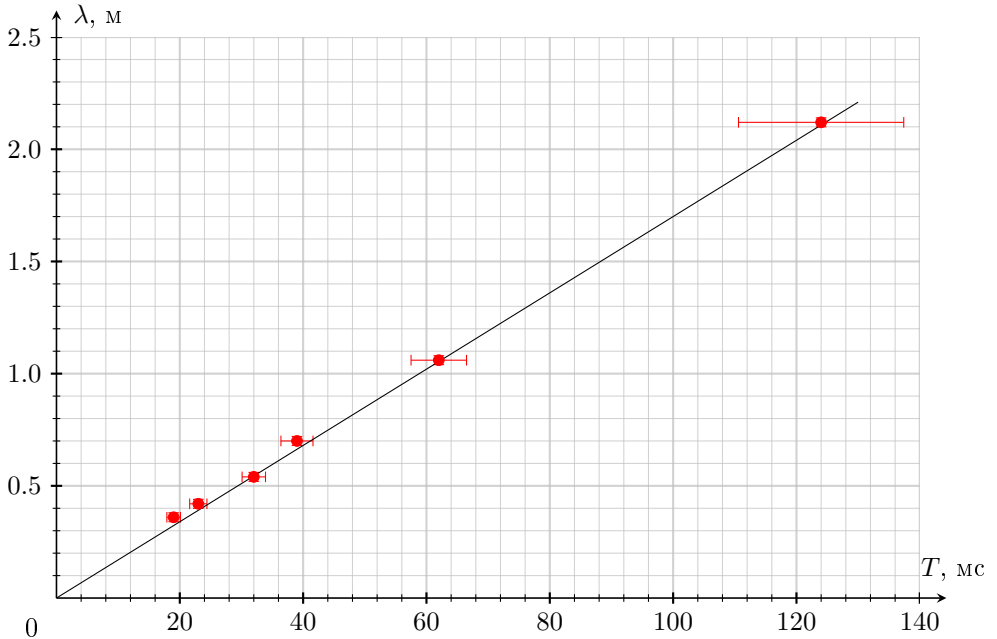


График зависимости длины бегущей волны в леске от периода вращения вала мотора.

Видно, что график описывается прямой пропорциональностью с угловым коэффициентом  $v = (17 \pm 1)$  м/с. Угловым коэффициентом графика имеет смысл скорости распространения поперечных волн в леске.

Скорость распространения волн зависит от погонной плотности лески и от силы ее натяжения. Запишем данную в условии формулу с точки зрения размерностей:

$$\frac{\text{м}}{\text{с}} = \frac{\text{кг}^i}{\text{м}^i} \text{Н}^j = \frac{\text{кг}^i}{\text{м}^i} \cdot \frac{\text{кг}^j \text{м}^j}{\text{с}^{2j}}$$

Легко сделать вывод, что  $j = 0,5$  и  $i = -0,5$ . То есть формулу можно записать как:

$$v = \sqrt{\frac{T + T_0}{\rho}}$$

Проведем измерения, аналогичные пункту 2.3, для определения скорости распространения волн при разных силах натяжения лески.

$m$ , г	$\lambda/2$ , см	$U$ , В	$I$ , А	$\nu$ , Гц	$\sigma_\nu$ , Гц	$T$ , мс	$\sigma_T$ , мс	$\lambda$ , м
10	106	0,73	56	12,0	1,0	83,4	7,2	2,12
10	53	1,22	68	24,9	1,6	40,1	2,6	1,06
10	35	1,62	74	36,2	2,1	27,6	1,6	0,70
10	27	2,21	95	50,5	2,8	19,8	1,1	0,54
25	106	1,05	67	19,8	1,4	50,4	3,6	2,12
25	53	2,00	117	39,8	2,5	25,1	1,6	1,06
25	35	2,99	145	65,2	3,7	15,3	0,9	0,70
36	106	1,26	74	25,0	1,7	40,0	2,7	2,12
36	53	2,26	98	51,5	2,9	19,4	1,1	1,06
36	35	3,16	128	73,7	4,0	13,6	0,7	0,70
50	106	1,44	78	29,8	1,9	33,5	2,1	2,12
50	53	2,58	110	59,1	3,3	16,9	0,9	1,06
50	35	3,81	161	87,6	4,7	11,4	0,6	0,70

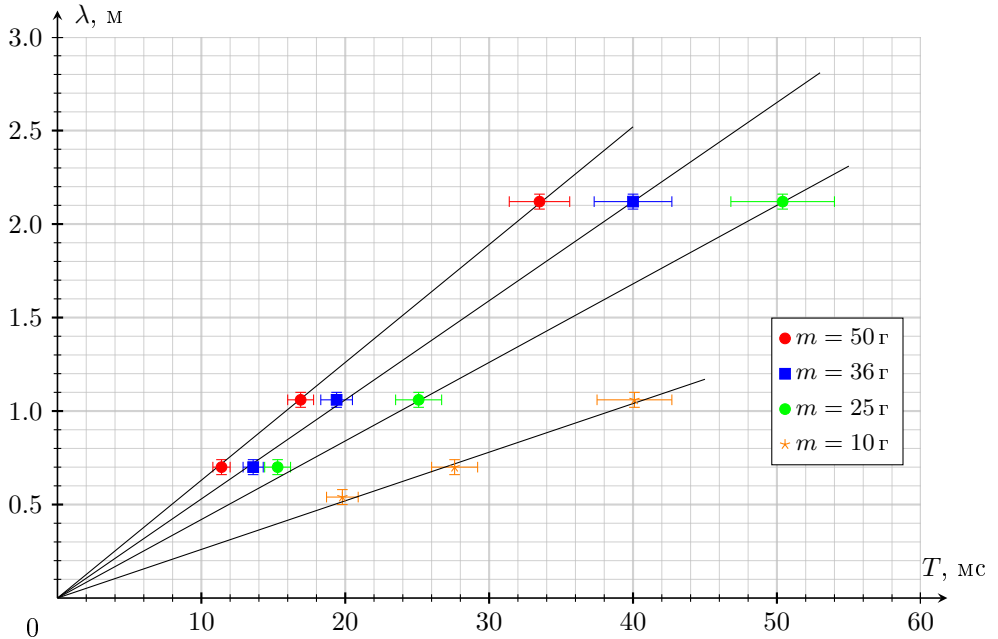


График зависимости длины волны от периода вращения вала мотора для разных масс подвешенных грузов.

Занесем полученные данные в таблицу.

$m, \text{ г}$	$v, \text{ м/с}$	$\sigma_v, \text{ м/с}$	$v^2/10^3, (\text{м/с})^2$	$\sigma_{v^2}/10^3, (\text{м/с})^2$
5	17	1	0,29	0,03
10	26	1	0,68	0,05
25	42	2	1,76	0,17
36	53	2	2,81	0,21
50	63	3	3,97	0,38

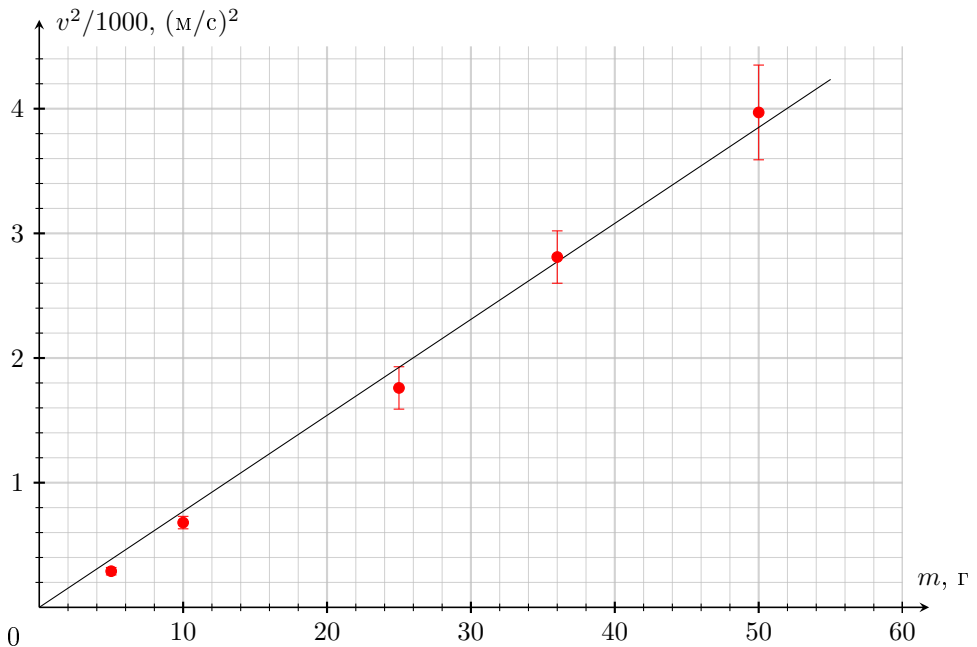
Сила натяжения лески равна силе тяжести груза  $T = mg$ . Тогда формула, описывающая скорость распространения волн, может быть записана как:

$$v = \sqrt{\frac{mg + T_0}{\rho}}$$

В соответствии с приведенной в условии формулой исследованная зависимость должна оказаться линейной в координатах  $v^2(m)$ . Рассчитаем значения квадратов скоростей. Оценим погрешность их измерения как:

$$\sigma_{v^2} = 2v\sigma_v.$$

Построим соответствующий график.



Зависимость квадрата скорости распространения волн в леске от массы подвешенного груза.

График легко описать линейной функцией с угловым коэффициентом  $\gamma = (77 \pm 3) \cdot 10^3 \frac{\text{м}^2}{\text{кг} \cdot \text{с}^2}$ . При этом свободный член этой линейной функции близок к нулю, что математически говорит о равенстве нулю коэффициента  $T_0$ . Физически это означает малое влияние на распространение волн в леске ее изгибной жесткости при исследованных силах натяжения. Рассчитаем погонную плотность лески:

$$\rho = \frac{g}{\gamma} = (0,127 \pm 0,005) \text{ г/м}.$$

Погрешность оценим как:

$$\sigma_\rho = \rho \frac{\sigma_\gamma}{\gamma}.$$