

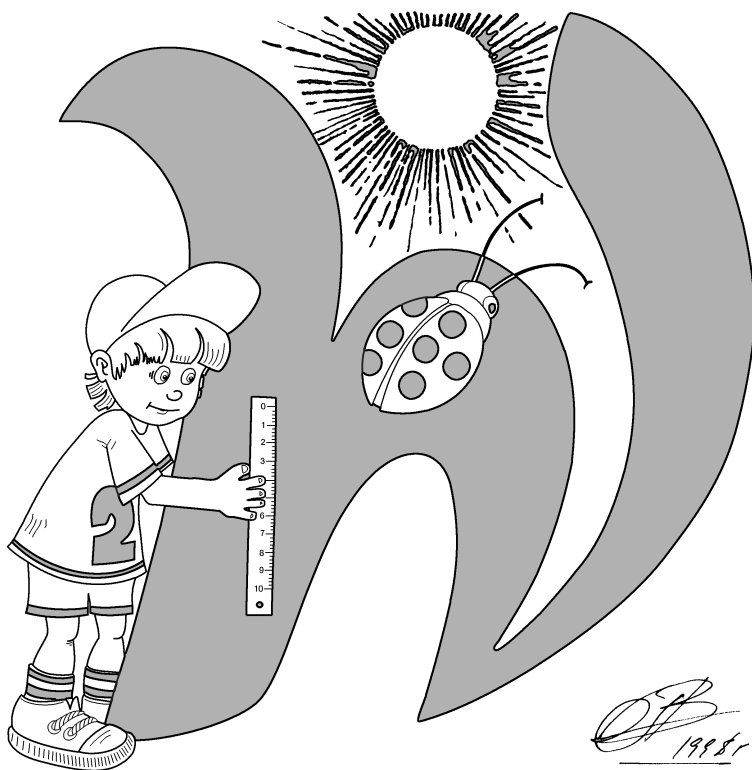
Методическая комиссия по физике  
при центральном оргкомитете  
Всероссийских олимпиад школьников

# Л Всероссийская олимпиада школьников по физике

Заключительный этап

Экспериментальный тур

Методическое пособие



Сочи, 2016 г.

Комплект задач подготовлен методической комиссией по физике при центральном оргкомитете Всероссийских олимпиад школьников  
Телефоны: (495) 408-80-77, 408-86-95.

E-mail: [physolymp@gmail.com](mailto:physolymp@gmail.com)

Сайт физических олимпиад школьников: [physolymp.ru](http://physolymp.ru)

## Авторы задач

### 9 класс

1. Замятнин М.
2. Кармазин С.

### 10 класс

1. Слободянин В.
2. Костарев В.

### 11 класс

1. Гуденко А.
2. Костарев В.

Общая редакция — Слободянин В.

При подготовке оригинал-макета использовалась издательская система L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 2<sub>ε</sub>.

© Авторский коллектив  
141700, Московская область, г. Долгопрудный  
Московский физико-технический институт

9 класс

Задача 1. Серый омметр

Вашему вниманию предлагаются две упрощённые модели внутреннего устройства омметра. Согласно первой, он состоит из соединённых последовательно идеального источника с напряжением  $U_0$ , резистора с сопротивлением  $r$  и идеального амперметра (рис. 1). Показания амперметра автоматически пересчитываются в сопротивление подключённого резистора  $R_x$ , которое отображается на цифровом табло прибора. В различных диапазонах измерения сопротивлений (200; 2000; 20k; 200k; 2000k) напряжение  $U_0$  источника и сопротивление  $r$  резистора могут отличаться.

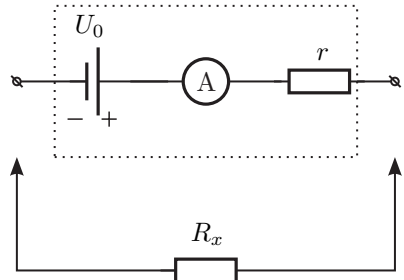


Рис. 1

Во второй модели (рис. 2) омметр представляет собой источник тока (устройство, обеспечивающее протекание через себя постоянного тока, равного  $I_0$ ), соединённый параллельно с идеальным вольтметром. Измеряемое напряжение пересчитывается в сопротивление подключённого резистора  $R_x$  и отображается на цифровом табло прибора. При этом, в различных диапазонах измерения сопротивлений (200; 2000; 20k; 200k; 2000k) сила тока  $I_0$  может отличаться.

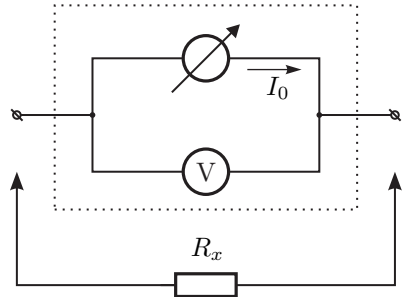


Рис. 2

**Задание**

1. Определите внутреннее сопротивление вольтметра для диапазонов измерений 20 В, 2000 мВ и 200 мВ.
2. Снимите зависимость напряжения  $U$  на омметре, работающем в режиме измерения 20 кОм, от величины сопротивления  $R_x$  подключённого к нему резистора.
3. Постройте график полученной экспериментальной зависимости  $U(R_x)$ .
4. В качестве доказательства справедливости одной из моделей, с учётом выведенных теоретических зависимостей, постройте график функции, связывающей измеренные величины  $U$  и  $R_x$  в таких осях, в которых она должна быть линейной.
5. Выберите лучшую модель устройства омметра, обосновав свой выбор.
6. В предположении, что выбранная модель работает для всех диапазонов, определите параметры элементов схемы омметра для каждого из диапазонов

(200; 2000; 20k; 200k; 2000k). Составьте таблицу полученных результатов и оцените их погрешность.

**Указания**

1. Чёрный мультиметр можно использовать только в режиме омметра!
2. Серый мультиметр можно использовать только в режиме вольтметра!
3. Выключайте приборы, если не проводите на них измерения.
4. Считать, что погрешность показаний приборов 1% или 2 единицы последнего разряда.

**Оборудование.** Исследуемый омметр (чёрный мультиметр, модель 830В) с проводами «крокодил», вольтметр (серый мультиметр) с проводами, переменный резистор (0–10 кОм) с проводами «крокодил», 2 листа миллиметровой бумаги для построения графиков.

### **Задача 2. Шарик в жидкости**

**Задание.** Подвесьте шарик на нити. Исследуйте зависимость силы натяжения нити от глубины погружения шарика в жидкость, налитую в стакан. Подвешенный на нити шарик нужно опускать в сосуд с жидкостью так, чтобы он не касался стенок и нить оставалась вертикальной.

1. Постройте график этой зависимости.
2. Определите плотность жидкости в сосуде.
3. Оцените погрешность полученных результатов.

**Указание.** Разбирать шарик и погружать деревянную линейку в жидкость нельзя!

**Оборудование.** Шарик на нитке, штатив с лапкой, деревянная линейка известной массы, металлическая линейка (30 см), стакан с жидкостью, лист миллиметровой бумаги для построения графика, лист белой бумаги А5, пустой пластиковый стакан, салфетки для поддержания чистоты.

## 10 класс

## Задача 1. Волны на поверхности воды

В данной работе изучаются волны на поверхности воды и определяется коэффициент поверхностного натяжения воды. Зависимость частоты  $f$  от длины волны  $\lambda$  для таких волн даётся следующей формулой:

$$f = \sqrt{\frac{g}{2\pi\lambda} + \frac{2\pi\sigma}{\rho\lambda^3}},$$

где  $g$  — ускорение свободного падения,  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения воды,  $\rho$  — плотность воды.

Для возбуждения волн используется вибратор, состоящий из двух линеек, скреплённых Т-образно (рис. 3). На линейке закреплён электродвигатель с пластмассовой планкой. Если планка, которую вращает двигатель, имеет не равномерное распределение масс, возникают вибрации. Двигатель прикреплен к линейке, погруженной в воду, и при его вращении возникают колебания линейки, которые и вызывают волны. Регулировать частоту можно меняя напряжение на двигателе.

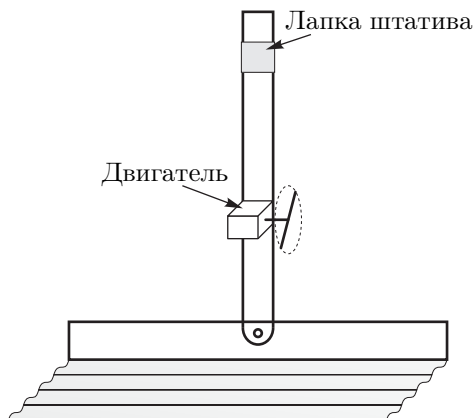


Рис. 3

1. Подайте на двигатель напряжение 8,5 В. Освещая двигатель стробоскопом, плавно увеличивайте частоту стробоскопа от 0 и наблюдайте за эксцентриком. Определите частоту  $f_m$  вращения двигателя.

2. Снимите зависимость длины поверхностных волн от их частоты. Напряжение на двигателе не должно превышать 8,5 В.

3. Определите коэффициент поверхностного натяжения  $\sigma$  раствора. Плотность жидкости  $\rho = 1,0 \text{ г/см}^3$ . Оцените погрешность.

*Примечание.*

1. Стробоскоп — прибор, позволяющий воспроизводить повторяющиеся яркие световые импульсы с заданной частотой. Для включения нажмите и удерживайте «READ». Для увеличения и уменьшения частоты используйте кнопки «UP» и «DOWN» соответственно. Для переключения в режим тонкой настройки нажмите «FINE ADJUST», при этом на экране появится надпись «FINE». Если нажать «FINE ADJUST» ещё раз, стробоскоп перейдёт обратно в режим грубой настройки. Для воспроизведения световых импульсов удерживайте нажатой кнопку справа сбоку. Возможно одновременно изменять частоту и освещать стробоскопом исследуемый объект. Частота мерцания указана

в количестве вспышек за одну минуту ( $\text{мин}^{-1}$ , RPM). При освещении некоторого объекта стробоскопом он виден только в моменты вспышек, поэтому, если отношение частоты вспышек стробоскопа к частоте рассматриваемого процесса близко к рациональному числу с малыми числителем и знаменателем, то можно наблюдать не зависящую от времени картину. Рассматривая вид такой картины на разных частотах можно определить частоту процесса.

2. В воду добавлены поверхностно активные вещества, сильно изменяющие коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

3. При зажиме вибратора в лапке штатива можно использовать тряпочку для надёжной фиксации.

**Оборудование.** Стробоскоп, вибратор: две соединённые линейки с прикреплённым двигателем и проводами, штатив с лапкой, тряпочка (для закрепления вибратора в лапку штатива), полоска бумаги шириной  $\approx 1$  см, металлическая линейка, регулируемый источник постоянного напряжения, поднос с жидкостью.

### Задача 2. Исследование жидкокристаллической ячейки

Жидкие кристаллы — это вещества, обладающие кристаллическими свойствами в одних направлениях (упорядоченность) и свойствами жидкостей в других. Они имеют широкое применение в науке и технике. Например, жидкие кристаллы используются в современных мониторах и экранах мобильных устройств (ЖК-дисплеи). Жидкокристаллическая ячейка — это составляющая часть пикселя жидкокристаллического дисплея. Увеличенный образец такой ячейки предлагается исследовать в данной задаче.

ЖК-ячейка является структурой из нескольких прозрачных слоёв (рис. 4). Между парами поляризаторов с проводящими поверхностями находится слой жидкого кристалла. Проводящие поверхности и слой жидкого кристалла представляют собой конденсатор. При приложении напряжения к ячейке длинные молекулы жидкого кристалла оказываются в электрическом поле и поворачиваются, тем самым меняются оптические свойства кристалла.

Ёмкость такого конденсатора зависит от приложенного напряжения. Кроме того, жидкий кристалл обладает слабой проводимостью, и конденсатор характеризуется некоторым сопротивлением утечки.

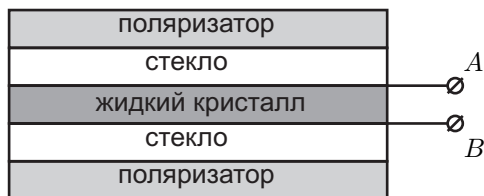


Рис. 4

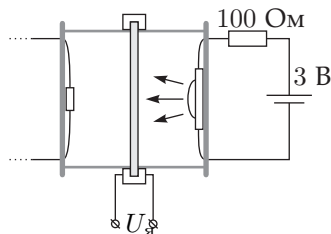


Рис. 5

#### Задание:

1. Соберите установку, указанную на схеме (рис. 5). Закрепите ЖК-ячейку между корпусами фото- и светодиодов. Корпуса должны плотно соприкасаться с ячейкой, чтобы уменьшить фоновую засветку. Сверху накройте установку чёрной плёнкой (закрепите резинкой). Снимите зависимость интенсивности прошедшего света  $I_{\text{пр}}$  (в относительных единицах) от напряжения  $U_{\text{я}}$  на ячейке. Исследуйте диапазон  $U_{\text{я}}$  от 0 В до 9 В. ЖК-ячейка является неполярной. Для измерения интенсивности света пользуйтесь люксметром (см. примечание).

Постройте график полученной зависимости. . . . . **4, 5 б.**

2. Снимите зависимость ёмкости ЖК-ячейки от напряжения  $U_{\text{я}}$  в интервале от 1 В до 3 В. . . . . **9 б.**

3. Оцените сопротивление утечки ЖК-ячейки. . . . . **1, 5 б.**

*Примечание.* В данной задаче оценивать погрешности не нужно!

*Примечание.* **Инструкция по использованию макетной платы.** Каждые пять выводов макетной платы, расположенные в одном столбце по одну



сторону от середины платы, соединены внутри платы друг с другом. Например, выводы, отмеченные серым (рис. 6), замкнуты между собой.

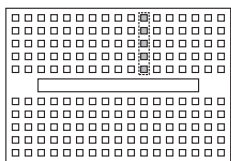


Рис. 6

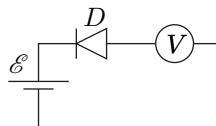


Рис. 7

*Примечание. Инструкция по использованию люксметра.* Для измерения интенсивности света используется люксметр. Он состоит из фотодиода в корпусе, батарейки и измерителя тока, собранных по схеме. (рис. 7)

В этой схеме ток через фотодиод прямо пропорционален интенсивности падающего на него света. Для измерения тока используйте мультиметр в режиме *вольтметра*. Внутреннее сопротивление вольтметра равно 1,00 МОм на всех диапазонах измерений.

*Примечание.* Светодиод — это источник света, а фотодиод — это измеритель интенсивности света. Не перепутайте!

**Оборудование.** жидкокристаллический затвор в рамке, светодиод в корпусе (последовательно соединён с резистором), фотодиод в корпусе, держатели корпусов светодиода и фотодиода на подставке, макетная плата, батарейка «крона», 2 батарейки АА в корпусе с проводами (только для питания светодиода), потенциометр, конденсатор 10 нФ, секундомер, 2 мультиметра, 2 провода для соединения мультиметра и макетной платы, два провода типа «крокодил», чёрная плёнка, резинка.

## 11 класс

### Задача 1. Лампа Вановского

1. Снимите зависимость сопротивления  $R$  вольфрамовой нити от её температуры  $t$  в возможно более широком температурном диапазоне. Результаты измерений занесите в таблицу.

2. Выясните, выполняется ли для вольфрама зависимость

$$R(t) = R_0(1 + \alpha t),$$

где  $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления,  $R_0$  — сопротивление при  $t = 0^\circ\text{C}$ .

3. Определите значения сопротивления  $R_0$  и температурного коэффициента сопротивления  $\alpha$  в области линейной зависимости  $R(t)$ .

4. Используя ваши экспериментальные данные и данные, указанные на упаковке лампы, оцените рабочую температуру  $t_p$  спирали лампы в номинальном режиме работы.

5. Погрузите лампочку в воду и снимите зависимость мощности  $P$  теплопередачи от разности  $\Delta t = t - t_{\text{в}}$  температур спирали лампочки  $t$  и окружающей лампочку воды  $t_{\text{в}}$  ( $P$  — установившаяся мощность теплоотвода от спирали лампочки к воде).

6. Выясните, выполняется ли для мощности теплоотвода закон Ньютона-Рихмана  $P = k\Delta t$ , где  $k$  — коэффициент теплопередачи.

7. Определите коэффициент  $k$  в области выполнения закона Ньютона-Рихмана.

8. Оцените вклад излучения спирали в мощность погруженной в воду лампы при её подключении к батарееке напрямую.

*Примечание.* Мощность теплового излучения тела с площадью поверхности  $S$ , абсолютная температура которого равна  $T$ , равна  $P = \sigma ST^4$ , где постоянная Стефана-Больцмана  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Дж/(с · м<sup>2</sup> · К<sup>4</sup>).

**Оборудование.** Лампа накаливания в упаковке, патрон для лампы, пенопластовый фиксатор лампы, мультиметр, 2 провода для мультиметра с «крокодилами», батарейка «крона», клемма для батарейки, макетная плата, 2 соединительных провода («крокодил-крокодил» и «плата-крокодил»), переменный резистор (0–1,0 кОм), резистор с сопротивлением  $R_N = 10$  Ом, термометр, 2 пластиковые ёмкости, алюминиевая кружка, штатив с лапкой, горячая и холодная дистиллированная вода (по требованию).

**Задача 2. Исследование жидкокристаллической ячейки**

Жидкие кристаллы — это вещества, обладающие кристаллическими свойствами в одних направлениях (упорядоченность) и свойствами жидкостей в других. Они имеют широкое применение в науке и технике. Например, жидкие кристаллы используются в современных мониторах и экранах мобильных устройств (ЖК-дисплеи). Жидкокристаллическая ячейка — это составляющая часть пикселя жидкокристаллического дисплея. Увеличенный образец такой ячейки предлагается исследовать в данной задаче.



Рис. 8

ЖК-ячейка является структурой из нескольких прозрачных слоёв (рис. 8). Между парами поляризаторов с проводящими поверхностями находится слой жидкого кристалла. Проводящие поверхности и слой жидкого кристалла представляют собой конденсатор. При приложении напряжения к ячейке длинные молекулы жидкого кристалла оказываются в электрическом поле и поворачиваются, тем самым меняются оптические свойства кристалла. После прохождения первого поляризатора свет становится линейно поляризован. Слой жидкого кристалла поворачивает плоскость поляризации света и не меняет амплитуду.

Ёмкость такого конденсатора зависит от приложенного напряжения. Кроме того, жидкий кристалл обладает слабой проводимостью, и конденсатор характеризуется некоторым сопротивлением утечки.

**Задание:**

1. Соберите установку, указанную на схеме (рис. 9). Закрепите ЖК-ячейку между корпусами фото- и светодиодов. Корпуса должны плотно соприкасаться с ячейкой, чтобы уменьшить фоновую засветку. Сверху накройте установку чёрной плёнкой (закрепите резинкой). Снимите зависимость интенсивности прошедшего света  $I_{пр}$  (в относительных единицах) от напряжения  $U_{я}$  на ячейке. Исследуйте диапазон  $U_{я}$  от 0 В до 9 В. ЖК-ячейка является неполярной. Для измерения интенсивности света пользуйтесь люксметром (см. примечание).

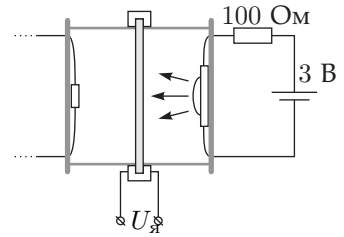


Рис. 9

Постройте график полученной зависимости. .... **3 б.**

2. Снимите зависимость ёмкости ЖК-ячейки от напряжения  $U_{я}$  в интервале от 1 В до 3 В. .... **6 б.**

3. Оцените сопротивление утечки ЖК-ячейки. .... **1 б.**

4. Определите разрешённые направления поляризаторов ЖК-ячейки. После этого перерисуйте изображения ячейки (рис. 10) в своё решение (буквы на рисунке обозначают цвет проводов), и на каждом рисунке стрелкой ука-

жите разрешённое направление переднего поляризатора при таком расположении проводов. .... **1, 5 б.**

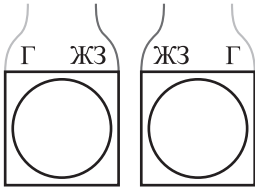


Рис. 10

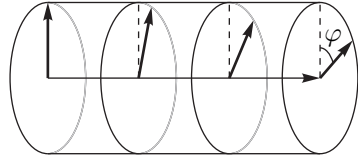


Рис. 11

5. Найдите зависимость угла  $\varphi$  поворота плоскости поляризации (рис. 11) в ЖК-ячейке от приложенного к ней напряжения. Считайте, что угол поворота при отсутствии напряжения  $\varphi(U_{я} = 0) = 90^\circ$ . .... **3, 5 б.**

*Примечание.* В данной задаче оценивать погрешность не нужно!

*Примечание.* **Инструкция по использованию макетной платы.** Каждые пять выводов макетной платы, расположенные в одном столбце по одну сторону от середины платы, соединены внутри платы друг с другом. Например, выводы, отмеченные серым (рис. 12), замкнуты между собой.

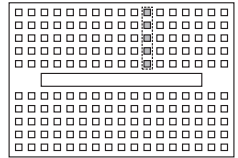


Рис. 12

*Примечание.* **Инструкция по использованию люксметра.** Для измерения интенсивности света используется люксметр. Он состоит из фотодиода в корпусе, батарейки и измерителя тока, собранных по схеме. (рис. 13)

В этой схеме ток через фотодиод прямо пропорционален интенсивности падающего на него света. Для измерения тока используйте мультиметр в режиме *вольтметра*. Внутреннее сопротивление вольтметра равно 1,00 МОм на всех диапазонах измерений.

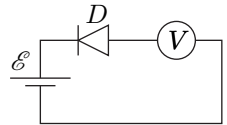


Рис. 13

*Примечание.* Светодиод — это источник света, а фотодиод — это измеритель интенсивности света. Не перепутайте!

**Оборудование.** Жидкокристаллическая ячейка в рамке с проводами, светодиод в корпусе (последовательно соединён с резистором), фотодиод в корпусе, поляризатор (направление поляризации указано меткой), держатели корпусов светодиода и фотодиода на подставке, макетная плата, батарейка «крона», 2 батарейки АА в корпусе с проводами (только для питания светодиода), потенциометр, конденсатор 10 нФ, секундомер, 2 мультиметра, 2 провода для соединения мультиметра и макетной платы, два провода типа «крокодил», чёрная плёнка, резинка.

## Возможные решения

### 9 класс

#### Задача 1. Серый омметр

Сопротивление мультиметра в режиме вольтметра на разных диапазонах измеряем непосредственно омметром. Оно составляет  $R_V = 1 \text{ МОм}$ . В дальнейшем, при измерениях напряжений на сопротивлениях, превышающих  $20 \text{ кОм}$  (в этом случае влияние вольтметра может вносить систематическую погрешность, превышающую  $2\%$ ), необходимо вносить поправку на конечность сопротивления вольтметра.

Для исследования зависимости напряжения на выходе омметра от величины измеряемого сопротивления  $R_x$  будем использовать переменный резистор и мультиметр в режиме вольтметра, подключённые параллельно (рис. 14). Омметр переведем в режим с пределом измерения  $20 \text{ кОм}$ .

Результаты измерений приведены в таблице 1 и на графике 1.

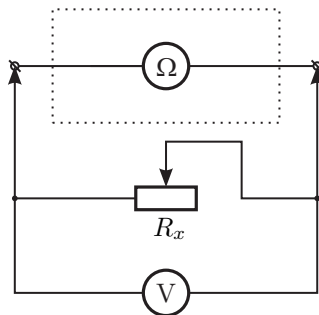


Рис. 14

$R_x$ , кОм	$U$ , мВ	$R_x$ , кОм	$U$ , мВ
0,0	0,0	4,0	693,0
1,0	214,0	5,0	812,0
1,5	309,0	6,0	919,0
1,8	362,0	7,0	1015,0
2,0	398,0	8,0	1105,0
2,4	462,0	9,0	1178,0
3,0	556,0		

Таблица 1: зависимость  $U_2(R_x)$ .

Теоретическая зависимость  $U(R_x)$  для первой модели имеет вид:

$$U = IR_x = \frac{U_0 R_x}{R_x + r}.$$

Для второй модели, с учётом идеальности внутреннего и внешнего вольтметров:  $U = I_0 R_x$ .

Так как характер зависимости не линейный (график 1), вторая модель далее может не рассматриваться.

Для проверки состоятельности первой модели целесообразно линеаризировать полученные результаты, построив график, например, в осях  $\frac{1}{U} \left( \frac{1}{R_x} \right)$ .

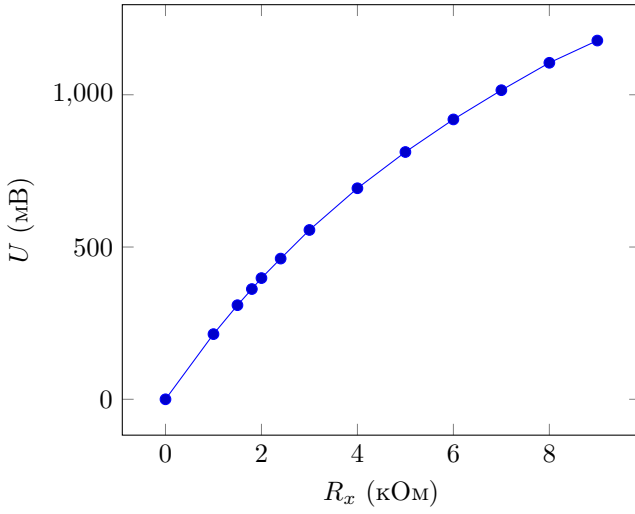


График 1

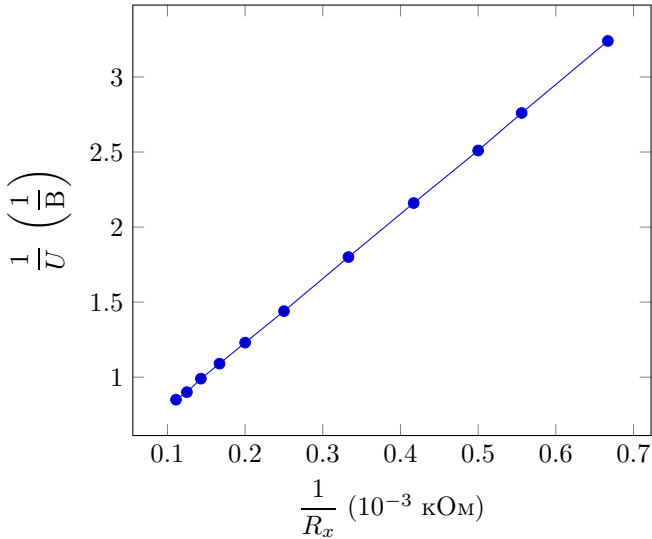


График 2

Теоретическая зависимость в этом случае имеет вид:  $\frac{1}{U} = \left( \frac{1}{U_0} + \frac{r}{U_0 R_x} \right)$ ,

и график должен соответствовать линейной функции вида  $y = a + bx$ , что блестяще подтверждается (график 2).

Далее, следует искать параметры элементов первой модели ( $U_0$  и  $r$ ) для различных диапазонов измерений омметра.

Соберём цепь 1 (рис. 15), и снимем показания вольтметра  $U_1$  для всех диапазонов (200; 2000; 20k; 200k; 2000k). Измерения можно проводить на диапазоне 20 В вольтметра.

Затем, соберем цепь 2 (рис. 16) и снимем показания вольтметра  $U_2$  для всех диапазонов при фиксированном значении сопротивления внешнего резистора  $R_x = R$  (например, 1 кОм). Измерения проводятся на диапазонах 2000 мВ и 200 мВ вольтметра. Получившиеся значения занесём в таблицу 2.

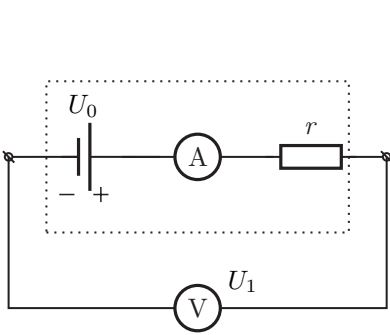


Рис. 15

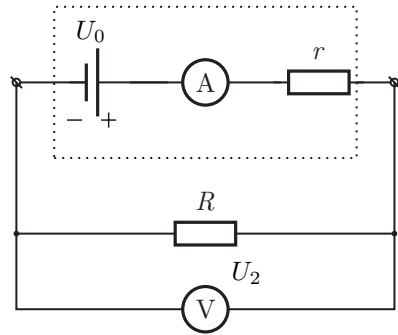


Рис. 16

Диапазон омметра	$U_1$ , В, $\varepsilon < 1\%$	$U_2$ , мВ, $\varepsilon < 1\%$
200 Ом	1,47	510
2000 Ом	2,66	787
20 кОм	2,63	211
200 кОм	2,42	25,3
2000 кОм	1,33	2,6

Таблица 2: значение  $U_1$  и  $U_2$  на разных диапазонах омметра.

В первой цепи сила тока, текущего через источник, равна  $I_1 = \frac{U_1}{R_V}$ , и  $U_1 = U_0 - \frac{U_1}{R_V}r$ . Во второй цепи сила тока, текущего через источник, равна  $I_2 = U_2 \left( \frac{1}{R_V} + \frac{1}{R} \right)$ , откуда  $U_2 = U_0 - U_2 \left( \frac{1}{R_V} + \frac{1}{R} \right) r$ . Решая систему

уравнений, получим точные формулы для

$$r = \frac{U_1 - U_2}{U_2 \left( \frac{1}{R_V} + \frac{1}{R} \right) - \frac{U_1}{R_V}} \quad \text{и} \quad U_0 = \frac{U_1 U_2 R_V}{U_2 (R_V + R) - U_1 R},$$

или приближенные с учётом  $R_V \gg R$ :

$$r^* = \frac{U_1 - U_2}{\frac{U_2}{R} - \frac{U_1}{R_V}} \quad \text{и} \quad U_0^* = \frac{U_1 U_2 R_V}{U_2 R_V - U_1 R}.$$

Если считать сопротивление вольтметра бесконечно большим (модель идеального вольтметра), получается грубое приближение:  $r^{**} = \frac{U_1 - U_2}{U_2} R$  и  $U_0^{**} = U_1$ .

Результаты расчётов представлены в таблице 3.

диапазон	$U_1$ , В	$U_2$ , В	$r$ , кОм	$r^*$ , кОм	$r^{**}$ , кОм
			точная формула	приближение 1	грубое приближение
200 Ом	1,47	0,51	1,885	1,887	1,882
2000 Ом	2,66	0,787	2,385	2,388	2,379
20 кОм	2,63	0,211	11,60	11,61	11,46
200 кОм	2,42	0,0255	103,6	103,7	93,9
2000 кОм	1,33	0,0026	1043	1045	510,5

диапазон	$U_1$ , В	$U_2$ , В	$U_0$ , В	$U_0^*$ , В	$U_0^{**}$ , В
			точная формула	приближение 1	грубое приближение
200 Ом	1,47	0,51	1,47	1,47	1,47
2000 Ом	2,66	0,787	2,67	2,67	2,66
20 кОм	2,63	0,211	2,66	2,66	2,63
200 кОм	2,42	0,0255	2,67	2,67	2,42
2000 кОм	1,33	0,0026	2,72	2,72	1,33

Таблица 3: контрольные данные.

Погрешность результатов ввиду сложных аналитических зависимостей можно оценить с помощью формул грубого приближения:  $\varepsilon_{U_0} \approx \varepsilon_{U_1} = 1\%$ ,  $\varepsilon_r \approx \varepsilon_{U_1} + \varepsilon_{U_2} + \varepsilon_R = 3\%$ .



## Задача 2. Шарик в жидкости

Первым делом определим положение центра масс линейки.

Для измерения силы натяжения будем использовать линейку в качестве рычага, осью которого служит стержень, закреплённый в штативе.

Подвесим шарик так, чтобы он касался поверхности воды, и определим значения величин  $h_0$  и  $H_0$  (рис. 17).

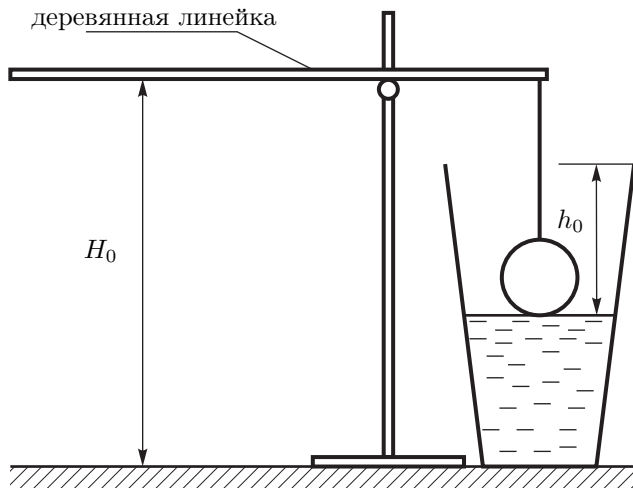


Рис. 17

Уравновесим на рычаге частично погружённый в жидкость шарик. С помощью металлической линейки будем измерять расстояние от уровня жидкости в стакане до его верха  $h$  и расстояние от поверхности стола до деревянной линейки  $H$  в точке опоры (рис. 18). При этом следим за горизонтальностью линейки, проверяя равенство расстояний от линейки до стола у точки опоры и у свободного конца линейки. Сумма  $H + h$  отличается от искомой глубины погружения шарика на постоянную величину  $H_0 + h_0$ .

Глубина погружения шарика  $l = H_0 + h_0 - h - H$ . Сила натяжения нити рассчитывается по правилу моментов сил, записанного относительно точки опоры линейки:  $T_x = mg(x_0 - x)$ , где  $x$  — расстояние от точки опоры до точки подвеса шарика,  $x_0$  — расстояние от точки подвеса шарика до центра масс линейки.

Запишем условия равновесия для шарика:  $T + F_{\text{арх}} = m_{\text{ш}}g$ .

В нашем эксперименте  $H_0 = 260$  мм,  $h_0 = 70$  мм,  $L = 247$  мм, масса линейки  $m = 22,62$  г. Результаты измерений приведены в таблице.

Построим график зависимости силы натяжения нити от глубины погружения шарика  $T(l)$  (рис. 19).

Из графика видно, что при погружении шарика примерно наполовину, зависимость становится линейной. Это объясняется тем, что форму централь-

ной части шарика можно приближенно считать цилиндрической. Для определения площади поперечного сечения измерим длину окружности шарика  $L$ , прокатив его по линейке:  $S = \frac{L^2}{4\pi}$ .

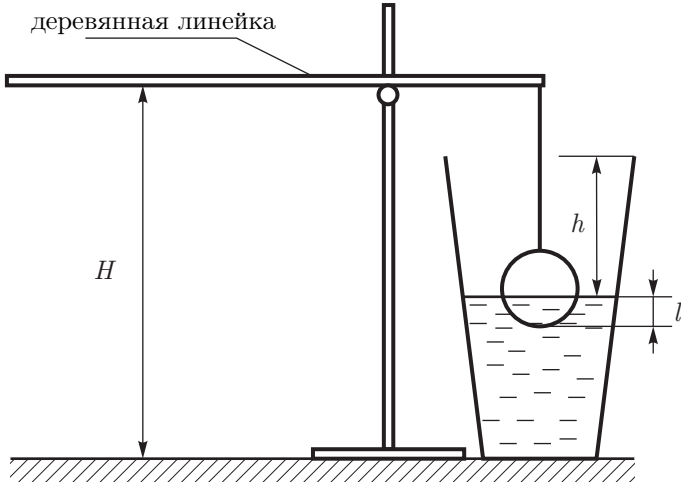


Рис. 18

Для линейного участка графика сила  $T$  пропорциональна глубине погружения шарика. По угловому коэффициенту (который равен  $\rho_{жg}S = 31,5 \text{ Н/м}$ , где  $S$  — площадь поперечного сечения шарика в экваториальной плоскости) определяем плотность жидкости  $1,17 \text{ г/см}^3$ .

Оценим погрешность эксперимента.

Глубину погружения шарика мы вычисляем по 2-м расстояниям, каждое из которых измерено с погрешностью  $0,5 \text{ мм}$  (конец линейки точно прикладывается к поверхности стола и уровню воды), значит,  $\Delta l = 1 \text{ мм}$ . Сила натяжения вычисляется по формуле  $T = \frac{mgl_1}{l_2}$ , значит,

$$\varepsilon_T = \varepsilon_m + \varepsilon_{l_1} + \varepsilon_{l_2} = 0,01 + 0,025 + 0,01 \approx 0,05$$

$$\varepsilon_S = 2\varepsilon_L = 2 \frac{\Delta L}{L} = 2 \frac{2 \text{ мм}}{186 \text{ мм}}$$

На графике нарисуем кресты ошибок и построим прямые с наибольшим и наименьшим углами наклона. Погрешность определения углового коэффициента равна полуразности максимального и минимального коэффициентов, или  $\varepsilon_k = 0,06$ . Тогда  $\varepsilon_\rho = \varepsilon_k + \varepsilon_S = 0,08$  и, окончательно,

$$\rho = (1,17 \pm 0,09) \text{ г/см}^3.$$

$H$ , мм	$h$ , мм	$l$ , мм	$x$ , мм	$T$ , Н
258,5	69,0	2,5	44,0	1,02
257,5	68,0	4,5	45,0	1,00
256,5	66,5	7,0	46,5	0,96
255,0	67,0	8,0	47,5	0,93
254,0	67,0	9,0	48,0	0,92
253,5	65,5	11,0	50,0	0,87
252,0	64,0	14,0	53,0	0,81
251,0	63,0	16,0	58,5	0,71
249,0	61,0	20,0	62,0	0,66
248,0	59,0	23,0	69,0	0,57
247,0	58,0	25,0	75,0	0,51
246,0	56,0	28,0	88,0	0,40
245,0	54,0	31,0	101,0	0,32
243,5	52,5	34,0	116,0	0,25

Таблица 4

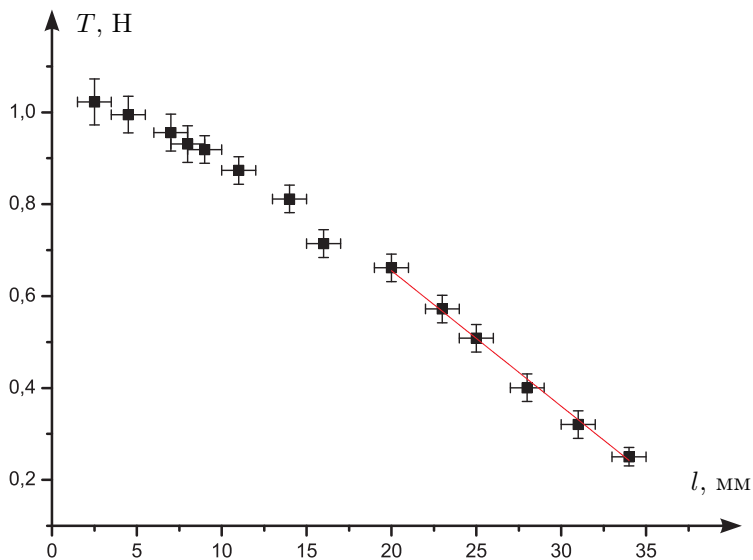


Рис. 19

**10 класс**

**Задача 1. Волны на поверхности воды**

1. Для измерения частоты вращения двигателя подбираем частоту вспышек таким образом, что на эксцентрике видно одну неподвижную метку (например, можно использовать в качестве метки прикрепленный к диску груз), а при удвоении частоты стробоскопа видно две метки. Из этого следует, что меньшая из этих частот совпадает с частотой вращения эксцентрика.

Заметим, что выполнение только первого условия не гарантирует совпадения частот двигателя и стробоскопа, так как возможна ситуация, когда между вспышками стробоскопа вал двигателя повернется больше одного раза.

2. Для создания волн на поверхности воды сместим центр масс планки, используя кусочек бумаги в качестве эксцентрика.

Измерения длины волны проводим с помощью линейки, расположенной на дне подноса примерно посередине, так как вблизи краев волны искажаются. Настроим стробоскоп на частоту двигателя и направим его на поверхность воды, при этом наблюдается статическая картина, то есть частота двигателя совпадает с частотой волны (при необходимости можно скорректировать частоту стробоскопа, чтобы она всё-таки совпала с частотой вращения двигателя) поэтому мы можем измерить длину волны. При низких (меньше 30 Гц) частотах измерение длин волн затруднено, поэтому используем частоту в два раза больше, в два раза большую чем частота волны.

3. С помощью полученных данных построим график зависимости величины  $\lambda f^2$  от  $1/\lambda^2$ . По угловому коэффициенту графика  $k = 2\pi\sigma/\rho$  получаем значение  $\sigma = (2,2 \pm 0,2) \cdot 10^{-2}$  Н/м.

**Задача 2. Исследование жидкокристаллической ячейки**

1. Для измерения коэффициента пропускания в держателе закрепим светодиод, фотодиод и жидкокристаллическую ячейку между ними. Соберём схему измерения (рис. 20). Вращая ручку потенциометра, будем изменять напряжение  $U_{я}$  на ячейке, и снимать показания люксметра (значение обратного тока через фотодиод найдём, зная внутреннее сопротивление вольтметра  $I_{\phi} = U_{в}/R_{в}$ ). Построим график  $I_{\phi}(U_{я})$  (рис. 21).

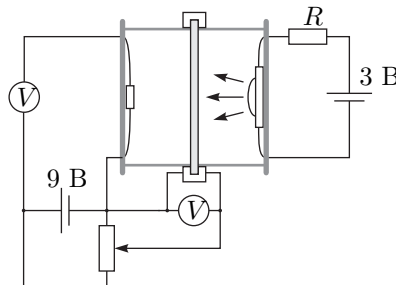


Рис. 20

2. Зарядим конденсатор  $C_0 = 10$  нФ до некоторого напряжения  $U_0$ , а ЖК-ячейку разрядим. Ёмкость ячейки  $C$  определим заряжая её от конденсатора  $C_0$ . После перераспределения заряда  $q_0 = C_0 U_0$  напряжение  $U_1$  на конденсаторах одинаково, поэтому ёмкость затвора равна

$$C = C_0 \left( \frac{U_0}{U_1} - 1 \right).$$

Заметим, что напряжение  $U_1$  на конденсаторах не удаётся определить с помощью вольтметра, так как характерное время разрядки через вольтметр  $\tau = R_{\text{в}} C \approx 1$  мс. Для определения напряжения на ячейке воспользуемся графиком коэффициента пропускания, полученного в пункте 1. Результаты занесём в таблицу.

$U$ , В	0.69	1.34	1.41	1.53	1.72	1.84	2.02
$C$ , нФ	30	14.3	15.8	16.5	16.9	18.0	18.5
$U$ , В	2.16	2.28	2.4	2.56	2.79	2.99	
$C$ , нФ	19.3	19.7	21.1	21.8	21.6	22.0	

3. Зарядим ячейку до напряжения  $U_0 = 3,0$  В, отключим от батарейки и будем наблюдать за показаниями люксметра от времени. Через время  $t = 60$  с напряжение на ячейке составит  $U_1 = 1,8$  В. Для оценки считаем что ёмкость постоянна в данном диапазоне напряжений. Сопротивление утечки равно

$$R = \frac{t}{C \ln U_0/U_1} \approx 2 \text{ ГОм.}$$

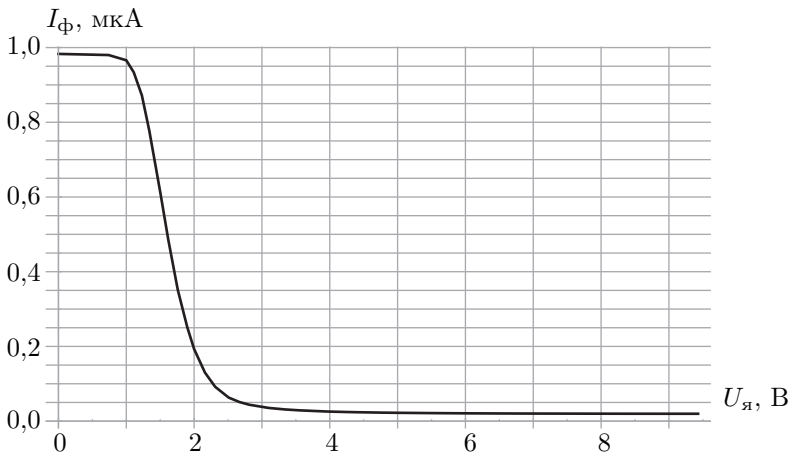


Рис. 21

## 11 класс

### Задача 1. Лампа Вановского

Для измерения зависимости сопротивления  $R$  лампы от температуры  $t$  наливаем в алюминиевый стакан горячую воду и погружаем в воду лампочку. К выводам лампочки подсоединяем мультиметр в режиме омметра. Считаем, что температура нити лампочки равна температуре воды, так как ток омметра достаточно мал, а скорость охлаждения воды невелика. Измеряя температуру с помощью термометра, снимаем зависимость показаний омметра от температуры воды по мере её охлаждения, при необходимости подливая холодную или горячую воду. По полученным данным строим график зависимости  $R(t)$ . Видно, что практически во всём температурном диапазоне сопротивление  $R$  изменяется с температурой по линейному закону. Находим численные значения  $R_0 = 196,5 \pm 2,0$  Ом,  $\alpha = (4,4 \pm 0,1) \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ .

По номинальным значениям мощности и напряжения, взятых с коробки для лампы, находим её сопротивление в номинальном режиме  $R_{\text{н}} = U_{\text{н}}^2/P_{\text{н}} = 2645$  Ом, а отсюда температуру спирали:

$$t_P = \frac{R_{\text{н}} - R_0}{\alpha R_0} = 2800 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Заметим, что получившаяся температура близка к яркостной температуре, указанной на коробке от лампочки (2800 К). Это подтверждает правомерность экстраполяции зависимости сопротивления от температуры.

Лампу подключаем к батарее через переменный резистор, позволяющий регулировать силу тока через лампочку. Последовательно с лампочкой подсоединяем также резистор  $R_N = 10$  Ом. Напряжение  $U$  на лампочке измеряем мультиметром в режиме вольтметра, а ток — по падению напряжения  $U_N$  на резисторе  $R_N$ :  $I = U_N/R_N$ . Погружаем лампу в воду при комнатной температуре и снимаем зависимость установившегося значения мощности  $P$ , выделяемой на спирали лампы, от разности  $\Delta t$  температур  $t$  спирали и окружающей лампу воды  $t_{\text{в}}$ . Температуру  $t_{\text{в}}$  воды регистрируем термометром. В процессе измерений  $t_{\text{в}}$  практически не изменяется. Температуру спирали определяем, зная её сопротивление  $R$ , по формуле:

$$t = \frac{R - R_0}{\alpha R_0}.$$

Мощность, выделяемую на спирали находим по формуле  $P = IU$ , где  $I$  — ток через лампочку,  $U$  — падение напряжения на лампочке. Сопротивление спирали рассчитываем по закону Ома:  $R = U/I$ .

Для проверки закона теплопередачи Ньютона-Рихмана строим график зависимости  $P(\Delta t)$ . Видно, что в исследованном диапазоне разности температур  $\Delta t$  зависимость  $P(\Delta t)$  можно считать прямой пропорциональностью  $P \sim \Delta t$ ,

значит закон Ньютона-Рихмана более-менее выполняется. Коэффициент теплопередачи  $k = 1,0 \pm 0,1$  мВт/К.

Оценим сверху вклад излучения спирали в мощность, зная температуру в номинальном режиме, где можно предполагать, что значительная часть потребляемой мощности выделяется в виде излучения:

$$P_{\text{н}} \geq \sigma S T_p^4, \quad P_{\text{из}} = \sigma S T^4, \quad \text{откуда} \quad P_{\text{из}} \leq \left(\frac{T}{T_p}\right)^4 P_{\text{н}} \approx 15 \text{ мВт.}$$

Потребляемая лампой мощность при таком подключении  $P = 0,2$  Вт. Вклад излучения достаточно мал:  $\beta = P_{\text{из}}/P \leq 7\%$ .

### Задача 2. Исследование жидкокристаллической ячейки

1. Для измерения коэффициента пропускания в держателе закрепим светодиод, фотодиод и жидкокристаллическую ячейку между ними. Соберём схему измерения (рис. 22). Вращая ручку потенциометра, будем изменять напряжение  $U_{\text{я}}$  на ячейке, и снимать показания люксметра (значение обратного тока через фотодиод найдём, зная внутреннее сопротивление вольтметра  $I_{\text{ф}} = U_{\text{в}}/R_{\text{в}}$ ). Построим график  $I_{\text{ф}}(U_{\text{я}})$  (рис. 23).

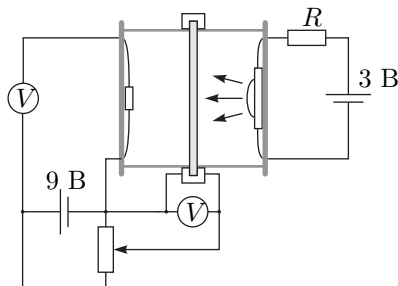


Рис. 22

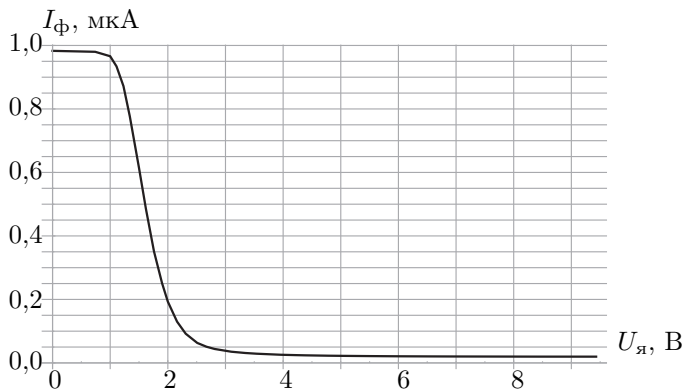


Рис. 23

2. Зарядим конденсатор  $C_0 = 10$  нФ до некоторого напряжения  $U_0$ , а ЖК-ячейку разрядим. Ёмкость ячейки  $C$  определим заряжая её от конденсатора  $C_0$ . После перераспределения заряда  $q_0 = C_0 U_0$  напряжение  $U_1$  на конденсаторах одинаково, поэтому ёмкость затвора равна

$$C = C_0 \left( \frac{U_0}{U_1} - 1 \right).$$

Заметим, что напряжение  $U_1$  на конденсаторах не удаётся определить с помощью вольтметра, так как характерное время разрядки через вольтметр  $\tau = R_{\text{в}}C \approx 1$  мс. Для определения напряжения на ячейке воспользуемся графическим коэффициентом пропускания, полученного в пункте 1. Результаты занесём в таблицу.

$U$ , В	0.69	1.34	1.41	1.53	1.72	1.84	2.02
$C$ , нФ	30	14.3	15.8	16.5	16.9	18.0	18.5
$U$ , В	2.16	2.28	2.4	2.56	2.79	2.99	
$C$ , нФ	19.3	19.7	21.1	21.8	21.6	22.0	

3. Зарядим ячейку до напряжения  $U_0 = 3,0$  В, отключим от батарейки и будем наблюдать за показаниями люксметра от времени. Через время  $t = 60$  с напряжение на ячейке составит  $U_1 = 1,8$  В. Для оценки считаем что ёмкость постоянна в данном диапазоне напряжений. Сопротивление утечки равно

$$R = \frac{t}{C \ln U_0/U_1} \approx 2 \text{ ГОм.}$$

4. После прохождения через неподключенную ячейку свет поляризован в направлении поляризации второго поляризатора. Будем смотреть сквозь анализатор (внешний поляризатор) и ЖК-ячейку. Вращая анализатор возле ячейки добьёмся минимального пропускания света. В данном случае направление поляризации анализатора и ближнего поляризатора ЖК-ячейки перпендикулярны.

5. Из предыдущего пункта можно сделать вывод, что направления поляризации слоёв ячейки перпендикулярны. Таким образом, поскольку жидкий кристалл поворачивает на  $90^\circ$  поляризацию света прошедшего через первый поляризатор, то в результате направление поляризации света на выходе из ЖК совпадает с разрешённым направлением второго поляризатора, а интенсивность проходящего света максимальна (рис. 24 а). После приложения некоторого напряжения ячейка «не доворачивает» свет в результате интенсивность прошедшего света определяется законом Малюса (рис. 24 б):

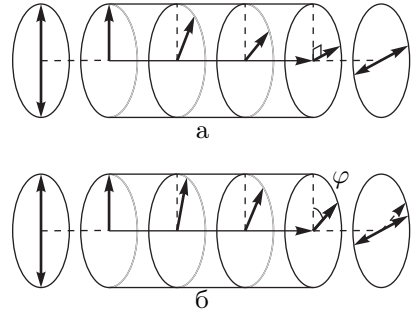


Рис. 24

$$I = I_0 \cos^2(90^\circ - \varphi) = I_0 \sin^2 \varphi.$$

Угол поворота ячейки найдём пересчётом зависимости интенсивности проходящего света от напряжения из пункта 1:

$$\varphi = \arcsin \sqrt{\frac{I_{\text{ф}}}{I_{\text{ф0}}}}.$$